



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports

UPC BARCELONATECH

**Evolución morfológica de la
cuenca torrencial el Rebaixader
(Pirineo central) durante los
últimos 70 años y su relación
con el cambio climático**

Trabajo realizado por:

Miguel Fernández Bimbo

Dirigido por:

Marcel Hürlimann Ziegler

Grado en:

Ingeniería Geológica

Barcelona, Junio 2017

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE GRADO

RESUMEN

Durante los últimos años el cambio climático ha sido un tema de actualidad, especulándose mucho sobre los efectos asociados al mismo. Entre los impactos globales, se prevé un incremento progresivo de la temperatura media del planeta, la elevación del nivel del mar y la fusión de los casquetes polares y de los glaciares. Respecto a las condiciones climáticas locales, se prevé que sean cada vez más frecuentes los fenómenos meteorológicos extremos (lluvias catastróficas, tornados y sequías, etc.), consecuencia de modificaciones en los sistemas de circulación oceánica y atmosférica.

Uno de los peligros geológicos que más riesgos origina en nuestro país son los movimientos de laderas en zonas de montaña. Los efectos económicos que tienen este tipo de fenómenos son muy variables ya que dependen de su frecuencia, tipo y condiciones orográficas donde se producen. Estas inestabilidades de ladera pueden afectar a obras de infraestructura, poblaciones y lugares de ocio, llegando a producir importantes pérdidas económicas y pérdida de vidas humanas. Por ello, el estudio y comprensión de estos fenómenos resulta fundamental en la planificación, ordenación del territorio y en la adopción de medidas correctoras y de prevención que intenten reducir sus efectos.

El presente trabajo se centra en el estudio de los movimientos en masa que se producen en el barranco de El Rebaixader, próximo a la población de Senet de Barrabés, en el Pirineo de la Alta Ribagorza (Lleida). Su objetivo principal sería el estudio de la evolución de dichos procesos desde el año 1946 hasta la actualidad a través del análisis de ortofotografías de la cuenca del barranco a partir de un SIG, a fin de cuantificar los procesos geomorfológicos que tienen lugar y correlacionarlos con la cubierta vegetal existente a lo largo de los distintos periodos.

Además, se realizaría un estudio pluviométrico de la zona de los últimos 70 años a partir de los registros obtenidos en las diferentes estaciones meteorológicas existentes, permitiendo conocer la evolución y la distribución mensual, anual y plurianual de la pluviometría con el objetivo de relacionar sus valores con la evolución de los movimientos en masa en la cuenca del Rebaixader.

A partir de los resultados obtenidos, se intentaría correlacionar los distintos factores considerados (grado de cobertura vegetal, velocidad de retroceso del escarpe, tasa de erosión/movilización de material) con la pluviometría a fin de establecer teorías empíricas sobre los fenómenos estudiados.

ABSTRACT

Climate change is being a hot topic during the last few years, and lots of things have been speculated about its effects. Amongst the global impacts, a progressive increase of the mean temperature on Earth, rise of the sea level and melting of the polar ice caps and glaciers are foreseen. With respect to the local climate conditions, more frequent extreme meteorological phenomena (catastrophic rains, tornadoes and droughts, etc.) are foreseen as a consequence of modifications in the oceanic and atmospheric circulation systems.

Hillside movements in mountainous areas are one of the geological hazards that cause more risk in our country. The economical effects of this kind of phenomena are highly variable and depend on the frequency, type and orographic conditions where they are produced. These hillside instabilities may affect infrastructure works, cities and leisure places, resulting in economic and human lives losses. Thus, the study and comprehension of these phenomena is of vital importance during the land-use planning and the adoption of corrective and prevention measures that are intended to reduce its effects.

This document is focused on the study of the mass movements that occur in the El Rebaixader ravine, close to the Senet de Barrabés town, located in the Pirineo de la Alta Ribagorza (Lleida). The main objective is to study the evolution of the aforementioned processes since 1946 until the actuality through the analysis of orthophotos of the basin's ravine by means of a GIS, so as to quantify the geomorphologic processes that occur and correlate them to the actual vegetation cover existent during the different periods.

Moreover, a rainfall study of the zone over the last 70 years will be performed by means of the gathered records in the different existent meteorological stations, that allow knowing the monthly, annual and multiannual rainfall evolution and distribution with the objective of relating its values to the mass movements evolution in the El Rebaixader basin.

The different considered factors (vegetation cover, escarpment backward velocity, material erosion/mobility rate) are correlated to the rainfall by means of the obtained results in order to establish empirical theories regarding the studied phenomena.

Índice

RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	4
1- INTRODUCCION.....	8
1.1 Motivación y problemática.....	8
1.2 Objetivos.....	8
1.3 Estructura del trabajo.....	9
2- CONCEPTOS BASICOS.....	10
2.1 Movimientos de masa.....	10
2.2 Corrientes de derrubios y características.....	13
2.2.1 Tipologías de corrientes de derrubios.....	14
2.2.2 Factores desencadenantes y características.....	15
2.3 Efecto de la meteorología y la vegetación sobre la erosión.....	16
2.4 Conceptos relacionados con propiedades mecánica de suelos e infiltraciones de agua en el terreno.....	17
3- ZONA DE ESTUDIO.....	20
3.1 Contexto regional.....	20
3.1.1 Geografía.....	20
3.1.2 Geología.....	21
3.2 Contexto local.....	22
3.3 Meteorología (y como ha cambiado a lo largo de los años).....	24
4- METODOLOGIA.....	25
4.1 Fotografías aéreas, MDE y perfiles topográficos.....	25
4.2 Análisis de suelo y escarpe mediante QGIS.....	31
4.2.1 Introducción.....	31
4.2.2 Desarrollo.....	32
4.3 Meteorología.....	42

5- RESULTADOS, ANÁLISIS Y CONCLUSIONES.....	44
6- LISTADO DE TABLAS.....	64
7- LISTADO DE FIGURAS.....	65
8- BIBLIOGRAFÍA.....	67

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación y problemática

Las zonas montañosas o de alta montaña son susceptibles de sufrir cambios morfológicos de diferente consideración debido a eventos climatológicos, generalmente a episodios de lluvia. Estos cambios morfológicos vienen precedidos de diferentes tipos de movimientos de masa, los cuales, en su mayoría suceden prácticamente sin previo aviso, lo que los hace altamente peligrosos.

Es por ello que el amplio estudio de estos fenómenos es fundamental para entender su naturaleza y evitar tragedias como la del camping “*Las Nieves*” en Biescas, Huesca (Aragón), situado sobre un cono de deyección, arrasado por una crecida extraordinaria del torrente de Arás.

Esta necesidad del estudio detallado de los riesgos geológicos en zonas montañosas se acentúa por el hecho de que en las últimas décadas estas zonas se han vuelto de interés turístico, con lo que el número de campings y zonas de actividades de ocio han aumentado, incrementando así las víctimas y daños materiales en caso de tragedia.

La presente tesina se basa en el caso de la Cuenca torrencial el Rebaixader, situada cerca de la población de Senet (municipio de Vilaller), en la comarca de la Alta Ribagorza, en el Pirineo Central, donde se estudiará su cambio morfológico a lo largo de las últimas décadas.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de esta tesina es el del análisis de la evolución morfológica de la cuenca torrencial el Rebaixader durante los últimos 70 años y el establecimiento de la relación de dichos cambios morfológicos con el cambio climático.

Para ello, disponemos de fotografías aéreas desde el año 1946 hasta la actualidad, así como registros de estaciones meteorológicas desde más tiempo.

Mediante dichas fotografías y registros meteorológicos, junto con los modelos digitales de elevación (MDE) correspondientes, llevaremos a cabo el estudio el cual nos permitirá representar e interpretar los cambios morfológicos en esta cuenca y establecer una relación con los datos meteorológicos.

Por otra parte, a partir de la interpolación de los datos obtenidos, se intentará estimar o predecir futuros cambios morfológicos en la zona a causa de futuros episodios meteorológicos.

1.3 Estructura del trabajo

Esta tesina se estructura en tres bloques diferentes.

El primero de ellos hace referencia a todos los conceptos geológicos y técnicos que se van a tratar a lo largo del trabajo, además de los instrumentos que se utilizarán para la captura de datos y una introducción a los modelos digitales del terreno (MDE), particularizando sobre nuestra zona de estudio, contextualizándola tanto geológica como geográficamente incluyendo, también, datos sobre la meteorología del lugar.

El segundo bloque trata sobre la metodología usada para llevar a cabo el estudio, así como la exposición de los resultados obtenidos mediante ilustraciones y gráficos, entre otros.

Finalmente, la última parte se basa en el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos en el bloque anterior, de los cuales obtendremos conclusiones las cuales se argumentarán y justificarán.

2. CONCEPTOS BÁSICOS

2.1 Movimientos de masa

El movimiento de masa se conoce como el proceso geomorfológico por el cual, en una pendiente con una cierta inclinación, el terreno se desliza hacia el exterior, cuesta abajo, con escalas temporales de segundos a años.

El principal factor causante es la gravedad, pero también depende de la cohesión, el ángulo de fricción interno del terreno y la resistencia al corte del terreno, entre otros factores.

Al tratarse de fenómenos complejos, se deben de diferenciar y clasificar según su tipología, ya que dependiendo de una u otra, las medidas de prevención o estabilización varían.

Hay numerosas clasificaciones para los movimientos de masa, aunque las más aceptadas internacionalmente son la Clasificación de Varnes (1978) y la Clasificación de Hutchinson (1988). Éstas se basan, principalmente, en las características cinemáticas de los movimientos.

A continuación, se explicarán los diferentes tipos de movimientos de masa según las dos clasificaciones anteriores, los cuales se representarán gráficamente.

-Desprendimientos o caídas (Falls)

Los desprendimientos o caídas son el despegue de la masa o roca de una pared inclinada. El movimiento se produce por caída libre y la posterior rodadura o rebote.

Normalmente el material desprendido se fragmenta a causa de la propia caída.

El movimiento es rápido, en segundos.

Si el material desprendido es un elemento de la parte superior, se llama desprendimiento, en cambio, si se trata de un elemento de la parte inferior y se desprende toda la columna, se llama colapso.

-Vuelco (Topples)

Es la rotación hacia el exterior de una masa de suelo o roca alrededor de un eje situado debajo de su centro de gravedad. La fuerza desestabilizadora es la gravedad y el empuje producido por el terreno o el agua y hielo en las grietas.

Se clasifican en dos tipologías diferentes:

- Vuelco a flexión*, a través de un sistema de discontinuidades

- Desplome*, al producirse un movimiento brusco de giro apoyado en su base externa

-Deslizamientos (Slides)

Un deslizamiento se trata de un desplazamiento ladero debajo de una masa de suelo o roca, que se produce por una o más superficies de rotura o en zonas delgadas con una alta deformación a cizalla.

Podemos diferenciar entre dos tipos de deslizamientos:

- Rotacional*, donde la rotura se produce a lo largo de una superficie curvilínea o cóncava
- Traslacionales*, donde la rotura se produce sobre una superficie plana u ondulada

-Expansiones laterales (Lateral spreads)

Las expansiones laterales son los movimientos de fracturación y de deslizamientos laterales de suelos o rocas en una ladera a causa de la licuefacción del material subyacente o al desplazamiento totalmente horizontal, que afecta a rocas blandas y deformables en las cuales no se observan zonas de cizalla o flujo plástico.

-Flujos (Flows)

Los flujos son movimientos de masa donde el material está disgregado y se comporta como un fluido, manteniendo una deformación continua y sin presentar superficies de rotura bien definidas.

Se pueden agrupar en diferentes tipologías:

- Reptación*, movimientos extremadamente lentos de capas finas de suelo
- Coladas de tierra*, deformación plástica y lenta de tierra o rocas blandas que adoptan forma de lengua alargada
- Solifluxión*, formaciones de pequeñas coladas de tierra a lo largo de la superficie
- Corrientes de derrubios*, movimientos rápidos de material detrítico
- Golpe de arena*, movilización brusca de tierra y limos por colapso estructural
- Avalanchas*, movilización de grandes cantidades de tierra y rocas a gran velocidad y distancia.

-Deformaciones sin rotura manifiesta o previa a la rotura

Son deformaciones de ladera sin formaciones de superficies de rotura ni el despegue de la masa movilizada. Se trata de deformaciones de poca extensión, aunque en grandes movimientos puede ser de varios metros.

Estas deformaciones pueden acelerarse hasta la rotura, reactivarse periódicamente o dejar de producirse.

Se clasifican según su movimiento: *movimientos gravitacionales profundos, roturas confinadas, cabeceo, reptación por fluencia, combadura y pandeo en valle.*


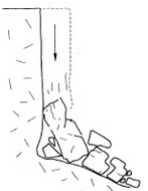
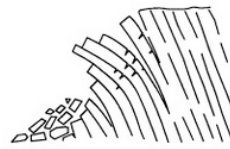
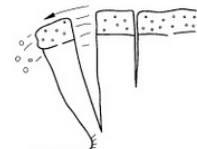

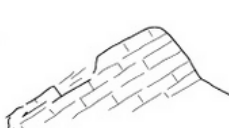



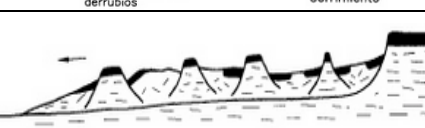
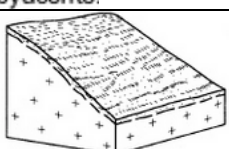
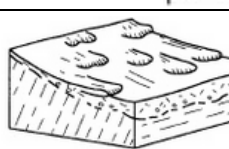




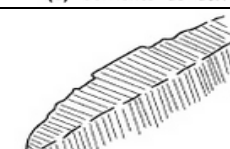
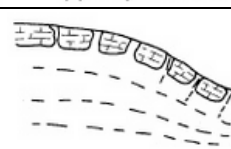
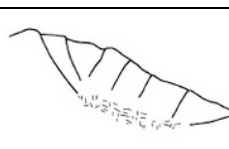


Desprendimientos y caídas	  <p>Desprendimiento Colapso</p>
Vuelcos	  <p>Vuelco por flexión Desplome</p>
Deslizamientos	    <p>Deslizamiento rotacional Resbalamiento Deslizamiento de derrubios Corrimiento</p>
Expansiones laterales	  <p>por fluencia y extrusión del material subyacente. por licuefacción (arcillas rápidas).</p>
Flujos	   <p>(a) Reptación (b) Soliflucción (c) Colada de tierra</p>    <p>(d) Corriente de derrubios (e) Golpe de arena (f) Avalancha de derrubios</p>
Deformaciones sin rotura manifiesta o previa a la rotura	   <p>Cabeceo Combadura Deformación gravitacional profunda</p>   <p>Pandeo Rotura confinada</p>

Tabla 1. Resumen de los movimientos de masa. Fuente: "Clasificación de las diferentes tipologías de movimientos de masa (Corominas y García Yagüe, 1996) y elaboración propia.

2.2 Corrientes de derrubios y características

A partir de ahora nos centraremos en este tipo de movimientos de masa, ya que es el fenómeno que afecta a nuestra zona de estudio.

Las corrientes de derrubios (Debris Flows) son movimientos rápidos de materiales finos (como arena, limos y arcillas) y gruesos (principalmente grava y bloques), que forman una mezcla fangosa que se desplaza pendiente abajo, normalmente canalizados por las depresiones del terreno de manera similar a un sólido viscoso, formando un cono de deyección.

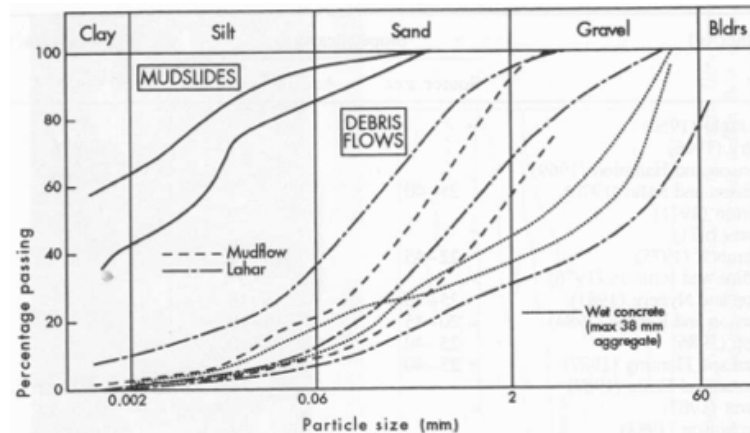


Figura 1. Distribución granulométrica de las corrientes de derrubios y de las coladas de barro (Hutchinson, 1988).

La causa principal es la poca cohesión del terreno, motivo por el cual este fenómeno ocurre, generalmente, en zonas con gran pendiente topográfico, mucha humedad y poca cobertura vegetal.

Habitualmente los flujos siguen vías de drenaje preexistentes, con secciones transversales en forma de V o rectangulares. Una parte del material grueso se deposita en los lados del terreno en movimiento, formando diques laterales llamados levees. El movimiento finalmente se detiene cuando disminuye el gradiente del canal o cuando llega al pie del barranco.

A lo largo del tiempo diferentes autores han debatido este fenómeno; Johnson (1970) definió los Debris Flows como un movimiento de masa comprendido entre los deslizamientos y las avenidas torrenciales, ya que, en el primero de ellos, el material desplazado es principalmente sólido, mientras que en el segundo se trata de agua, con lo que Johnson le atribuye a los Debris Flows características mecánicas de ambos fenómenos. Por otra parte, Varnes (1978) dijo que se trataba de un movimiento de masa rápido, formado por sólidos granulares (finos y gruesos), agua y aire, desplazándose como un fluido viscoso. Posteriormente, Johnson y Rodine (1984), lo definieron como un flujo granular mezclado con arcilla, agua y aire que desciende rápidamente.

En los corrientes de derrubios podemos diferenciar tres zonas:

-*El área fuente*: es la zona superior y más erosionada, donde se origina el movimiento, suele ser una zona escarpada con grandes pendientes y escasa vegetación constituida por suelos detríticos.

-*El canal*: es la zona intermedia del movimiento, de paso del corriente, con pendiente menor al área fuente, pero igualmente pronunciada. Está delimitada por los ya nombrados diques laterales, llamados levees.

-*Zona de acumulación*: es la zona inferior del movimiento, con pendiente menos pronunciada, donde finalmente el material acaba depositándose. A causa de la morfología del terreno, la forma del material acumulado es de abanico, llamados conos de deyección. Por efectos gravitacionales, los materiales quedan clasificados de manera que los materiales gruesos quedan depositados en la parte inferior del cono, mientras que los materiales finos se asientan en la zona superior.



Figura 2. Zonas de un Debris Flow. Fuente: <http://geology.com> y elaboración propia.

2.2.1 Tipologías de corrientes de derrubios

Según la topografía y las características geológicas de la zona, podemos diferenciar entre dos tipos de corrientes de derrubios distintos:

-*De ladera (Hillslope Debris Flow)*, el movimiento de masa no tiene límites geológicos previos, el propio deslizamiento abre su propio camino o canal, que acaba siendo delimitado por levées generados.

-*Canalizadas (Channelised Debris Flow)*, por otra parte, este tipo de corrientes de derrubios ocurren en canalizaciones preexistentes, como valles, barrancos o depresiones. Se trata de flujos de alta densidad, con lo que puede transportar rocas de grandes diámetros.

2.2.2 Factores desencadenantes y características

Las zonas susceptibles para la formación de este fenómeno, como hemos visto anteriormente, son aquellas en las que hay poca cohesión del terreno, con gran pendiente topográfico y poca cobertura general. Pero el principal factor desencadenante es una presencia excepcional de agua, aumentando las presiones intersticiales del suelo, provocando saturación y pérdida de resistencia del terreno.

Las precipitaciones intensas y las fundiciones rápidas de la nieve, entre otras, son las principales fuentes potenciales de estos excesos de agua.

Hay tres mecanismos distintos de formación de las corrientes de derrubios:

- Transformación directa a partir de un deslizamiento de corriente de derrubios
- Socavación de los márgenes de un barranco en una avenida torrencial y la posterior incorporación del material a la corriente
- Rotura de una presa natural de sedimento

Por otra parte, cuando hay un movimiento de masa, ésta se deforma esencialmente en las proximidades de la superficie de deslizamiento, pero no es la única, ya que simultáneamente se produce una deformación interna en el cuerpo del material. Los deslizamientos se transforman en flujos mediante dos mecanismos:

- Licuefacción*, se produce cuando la deformación interna supera un determinado valor crítico, perdiéndose resistencia. La fluidificación ocurre en presencia extra de humedad
- Dilatancia*, el material se deforma a causa de un incremento de su volumen. Este aumento de tamaño, debido a un crecimiento de poros y humedad, produce, también, una pérdida importante de resistencia.

2.3 Efecto de la meteorología y la vegetación sobre la erosión

La importancia de este apartado se basa en el hecho de que precisamente, los estudios del presente trabajo se realizan mediante el análisis de la meteorología y la vegetación de la zona afectada, por consiguiente, se verá el efecto que tienen éstos sobre el fenómeno de la erosión.

Unos de los principales desencadenantes erosivos son los episodios torrenciales extremos, aquellos breves en el tiempo pero de gran intensidad.

Como se verá en los siguientes apartados, este tipo de episodios aumentarían considerablemente a causa del Cambio Climático, lo cual verificaremos o disintiremos según los resultados finales. El efecto de la precipitación común, aquella no muy intensa pero larga en el tiempo, no influye en tal magnitud a la erosión, por lo tanto, se estudiará, principalmente la precipitación torrencial.

Por otra parte, también tiene importancia el papel que juega la vegetación en el fenómeno de la erosión sobre el terreno. En zonas con escasa o nula vegetación, el suelo, desprotegido, carece de cohesión, y es fácilmente erosionable. En cambio, aquellas regiones donde la vegetación abunda, el suelo, cubierto vegetalmente, posee gran cohesión a causa de la misma y su potencial erosivo es mucho menor.

Analizando los fenómenos anteriores, se puede establecer un criterio con la finalidad de determinar si la erosión sobre la zona en cuestión tiende a crecer o decrecer, el cual utilizaremos en nuestro caso particular. Consiste en analizar la zona a lo largo de determinados años y estudiar cómo ha evolucionado la vegetación, si ha aumentado, es un claro síntoma de disminución de la erosión, mientras si disminuye, la erosión está en aumento.

2.4 Conceptos generales sobre infiltración de agua en el terreno y propiedades mecánicas de suelos

-Infiltración de agua en el terreno

Como hemos visto, la presencia extra de agua en el terreno es el principal factor desencadenante de la corriente de derrubios, es por ello que en este apartado se explicará con más detalle el fenómeno de la infiltración de agua.

Hay dos factores principales que influyen en la infiltración de agua en el terreno:

-Capacidad de infiltración del suelo, que depende de la conductividad hidráulica del suelo, del contenido de agua (antecedentes), textura (a mayor tamaño de grano, mayor capacidad de infiltración del suelo), estructura (según su estructura puede aumentar o disminuir la capacidad de infiltración) y tipo de suelo (las arcillas expansivas tienen gran capacidad de infiltración en la etapa inicial pero una vez hinchadas, disminuye considerablemente). Generalmente en época de lluvia la capacidad de infiltración es mayor.

-Infiltración acumulada, es la infiltración total acumulada a una cierta profundidad o durante periodo de tiempo concreto.

$$I = \int_0^{z_f} \Delta\theta dz \quad (1)$$

Ecuación 1. Infiltración de agua a una cierta profundidad

$$I = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \quad (2)$$

Ecuación 2. Infiltración de agua durante un cierto periodo de tiempo

-Propiedades mecánicas de suelos

En este apartado nos centraremos en conceptos más técnicos sobre las propiedades mecánicas del suelo, para una mayor comprensión del caso en el que se basa esta tesina.

-Densidad, dependiendo del agua presente en el suelo, podemos diferenciar entre dos tipos de densidades:

-Densidad natural, es la densidad de un terreno en el campo, sin alterar, el cual se calcula como:

$$D_{nat} = \frac{(M_{agua}) + (M_{aire}) + (M_{suelo})}{V_{total}} ; \left(\frac{gr}{cm^3} \right) \quad (3)$$

-Densidad seca, este tipo de densidad se calcula sin presencia de agua, con lo que se lleva a cabo en laboratorio, con un secado previo a 105° C, por lo tanto, depende únicamente del propio suelo y de su porosidad.

$$D_{sec} = \frac{W_{ss} \text{ (peso del suelo seco)}}{V_{total}} ; \left(\frac{gr}{cm^3} \right) \quad (4)$$

-Porosidad, la porosidad se basa en los huecos del material, que están rellenos de aire o agua, generalmente. Pueden estar conectados entre sí o aislados y ser más grandes o menos. Por lo tanto, según el tipo de porosidad presente, tendrá más o menos capacidad de retención de agua; cuanto menores sean los poros (por ejemplo, terrenos arcillosos), mayor capacidad de retención, en cambio, cuanto mayor sean, menor capacidad.

La porosidad se suele expresar mediante las siguientes relaciones:

$$\eta = \frac{V_p \text{ (Volumen de poros)}}{V_{total}} \quad (5) \quad \text{ó} \quad \eta = \frac{D_{nat} - D_{sec}}{D_{nat}} * 100 \quad (6)$$

-Índice de poros, es la relación entre las partículas sólidas y el volumen de huecos:

$$e = \frac{V_p}{V_s} = \frac{\eta}{1 - \eta} \quad (7)$$

-Humedad (Volumen Volumétrico de Agua, VWC), es la cantidad de agua contenida en un material, que se expresa de manera proporcional de 0 (material completamente seco) hasta el valor de saturación, es decir, cuando el 100% de la porosidad está rellena de agua.

La fórmula es la siguiente:

$$VWC = \frac{V_w \text{ (Volumen de agua)}}{V_{total}} \quad (8)$$

-Grado de saturación, es el porcentaje de volumen del agua con relación al volumen total de huecos.

Su expresión matemática es:

$$S = \frac{V_w}{V_{huecos}} = \frac{V_w}{V_{total} * \eta} \quad (9)$$

-Permeabilidad, se trata de la capacidad de un material a ser atravesado por un fluido sin alterar su estructura interna. Por lo tanto, si un material deja pasar cierta cantidad de fluido en un tiempo determinado, es material permeable, por el contrario, si la cantidad es despreciable, impermeable.

-*Conductividad hidráulica (K)*, representa la mayor o menor facilidad con la que el suelo deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del propio flujo.

$$K = \frac{Q}{w(\text{anchura sección}) * d(\text{profundidad sección}) * (\frac{\Delta h}{\Delta l})} \quad (10)$$

3. ZONA DE ESTUDIO

Una vez expuestos los conceptos técnicos básicos para la comprensión de esta tesina, procedemos a situar tanto geográfica como geológicamente nuestra zona de estudio, finalidad de este tercer apartado.

Se empezará con una explicación sobre la geología y geografía general de la región para acabar focalizándolo a nuestro caso particular.

3.1 Contexto Regional

3.1.1 Geografía

La zona a estudiar se encuentra en la Alta Ribagorza, comarca pirenaica situada en la provincia de Lleida. Ubicada en el extremo Noroeste de Cataluña, limitando con el Valle de Arán al norte, el Pallars Sobirà al este, Pallars Jussà al sur y con la comarca de Aragón al oeste.



Figura 3. Situación geográfica de la Alta Ribagorza. (Wikipedia).

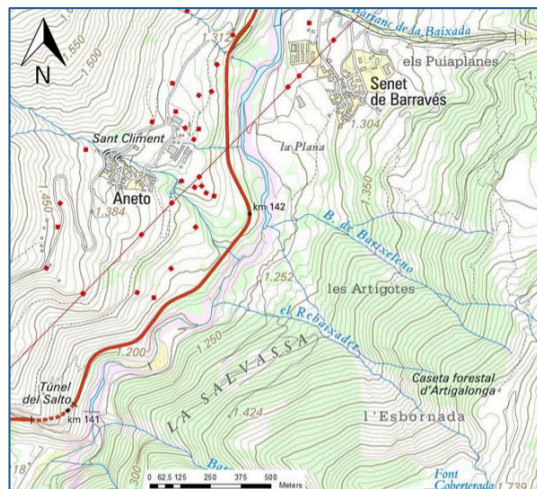


Figura 4. Situación topográfica de la Alta Ribagorza (ICGC).

Más concretamente, el pueblo de Senet de Barrabés (que se encuentra al oeste del conocido río Noguera Ribagorzana), está situado a poco menos de kilómetro y medio del “Barranc del Rebaixader”, nuestra zona de estudio, se trata de una entidad local descentralizada del municipio de Vilaller, perteneciente a la nombrada comarca de la Alta Ribagorza.

3.1.2 Geología

Nos encontramos en la zona axial pirenaica, donde el sustrato rocoso está formado generalmente por pizarras con algunas zonas de caliza y granito del Devoniano inferior y medio.

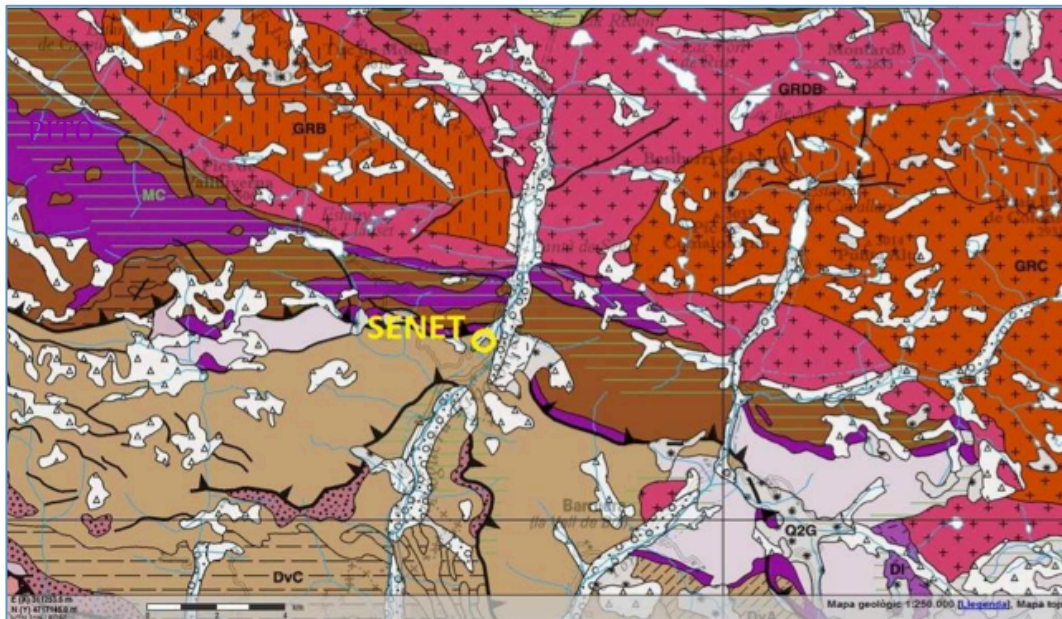


Figura 5. Mapa geológico de la zona de estudio, Escala 1:25000 (ICGC).

Por otra parte, las formaciones superficiales cuaternarias están formadas por depósitos glaciares. En la última glaciación, que tuvo lugar durante el Pleistoceno Superior, el valle de la Noguera Ribagorzana estuvo ocupado por un glaciar de unos 30km de longitud, el cual llegaba más allá del municipio de Vilaller (situado a unos 5km en línea recta del pueblo de Senet), que erosionó fuertemente el propio valle, sedimentándose till (material erosionado, transportado y sedimentado por los glaciares). Este material se caracteriza por ser un conjunto de sedimentos mal clasificados, constituido por clastos (de grava a grandes bloques) añadidos a una matriz lutítica (arcillas y limos) y/o arenosa. Al tratarse de depósitos poco consolidados e inclinados, son inestables, por lo tanto son propicios a las formaciones de corrientes de derrubios.

A causa del carácter granular de los tills, son bastante permeables, lo que supone un riesgo elevado de que se produzca debris flow durante un episodio intenso de lluvias. También juega un importante papel el grosor de estas formaciones superficiales, ya que cuanto mayor sea, mayor magnitud en caso de debris flow.

Durante el Holoceno, las vertientes de la zona con grandes pendientes recubiertos de tills se volvieron inestables y se produjeron una serie de movimientos de masa, incluido nuestro caso.

3.2 Contexto Local

Particularizando en nuestra zona de estudio, la cuenca tiene un área de aproximadamente $0,7 \text{ km}^2$. En el “Barranc del Rebaixader”, con orientación hacia el W, afloran los tills en vertientes con ángulos superiores a los 25° y el substrato rocoso está formado por pizarras.



Figura 6. Vista aérea del "Barranc del Rebaixader" (Google maps).

Estos tills aflorantes están formados, generalmente, por bloques y gravas de origen graníticos, con matriz lutítica y arenosa. Por otra parte, a causa de la erosión causada por el corriente de derrubios, se puede observar la base rocosa de pizarras, como vemos en la siguiente figura.



Figura 7. Fotografía donde se observa el substrato rocoso (pizarras) junto a los bloques del till.

En la siguiente ilustración veremos un corte geológico con orientación W-E correspondiente a la zona de estudio, donde están representados todos los materiales geológicos presentes, así como a la altura aproximada a la que llegó el glaciar.

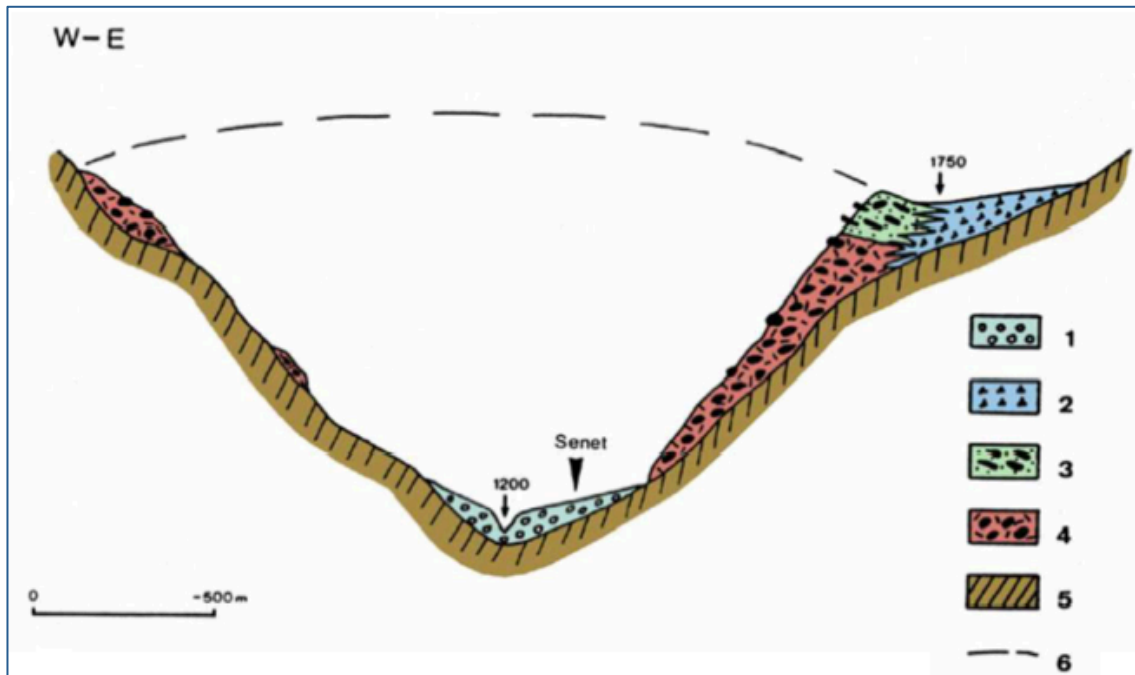


Figura 8. Corte geológico esquemático de la zona de estudio (Bordonau, 1992; modificado por Vilaplana, 1983).

- Leyenda:
- | | |
|------------------------------------|--|
| 1. Conos de deyección sub-actuales | 4. Till Sub-glaciar |
| 2. Depósitos de vertiente | 5. Sustrato rocoso paleozoico |
| 3. Till supra-glaciar | 6. Altura aproximada del antiguo glaciar |

3.3 Meteorología

Los episodios de lluvia son la principal causa desencadenante de los corrientes de derrubios y de los eventos de flujo en general en zonas de inestabilidad en las vertientes de alta montaña. En concreto, el episodio de lluvia más significativo es el de lluvia intensa de poca duración, que tiene lugar en los meses de verano.

En este apartado se va a caracterizar y resumir la meteorología de la zona, explicando sus diferentes situaciones meteorológicas, así como su pluviometría.

En los Pirineos centrales, donde esta situado el “Barranc del Rebaixader”, la precipitación media anual varía entre los 1000 y 1400 mm/año (Según Novoa, 1984).

Las lluvias de cierta intensidad en esta zona vienen dadas por diferentes situaciones meteorológicas:

- Lluvias ordinarias asociadas al paso de frentes fríos o cálidos, poniéndose en contacto masas de aire de diferente temperatura provocando precipitaciones. Aunque no suelen ser muy intensas, puede generar algún episodio extremadamente intensos
- Lluvias ligadas a la topografía del Pirineo. Ocurren generalmente durante los meses de Julio y Agosto, donde el ascenso de masas de aire húmedas, provenientes del Mediterráneo, se condensan provocando precipitaciones de cierta intensidad y poca duración
- Lluvias originadas por los vientos del levante, que entran en contacto con un frente frío y provocan fuertes precipitaciones durante la primavera y el otoño, generalmente.

4. METODOLOGÍA

En este segundo bloque se explicará amplia y detalladamente la metodología llevada a cabo para el estudio del proyecto, así como los criterios seguidos en cada una de las etapas del mismo. También se proporcionará información sobre el programa (QGIS) y los archivos utilizados.

Como vimos en la introducción, la presente tesina se basa en el estudio de la evolución de un movimiento de tierra en la cuenca torrencial de El Rebaixader, el cual realizaremos mediante la comparación de diferentes ortofotografías tomadas desde el 1946 hasta la actualidad, relacionando estos cambios morfológicos con la meteorología a lo largo de estos años.

4.1 Fotografías aéreas, MDE y perfiles topográficos

En este apartado se van a exponer los diferentes archivos y datos iniciales, proporcionados por el profesorado, mediante los cuales se ha llevado a cabo los diferentes estudios, dando explicaciones detalladas de cada uno de ellos.

Se trata de las diferentes ortofotografías (5 en total) sobre las que se ha trabajado, la primera de ellas del 1946, la segunda del 1957, la tercera del 1975, la cuarta del 1992 y finalmente la quinta es del 2016.



*Figura 9. Ortofotografía de la Cuenca torrencial El Rebaixader, 1946.
(Fuerza aérea española, facilitada por la UPC).*

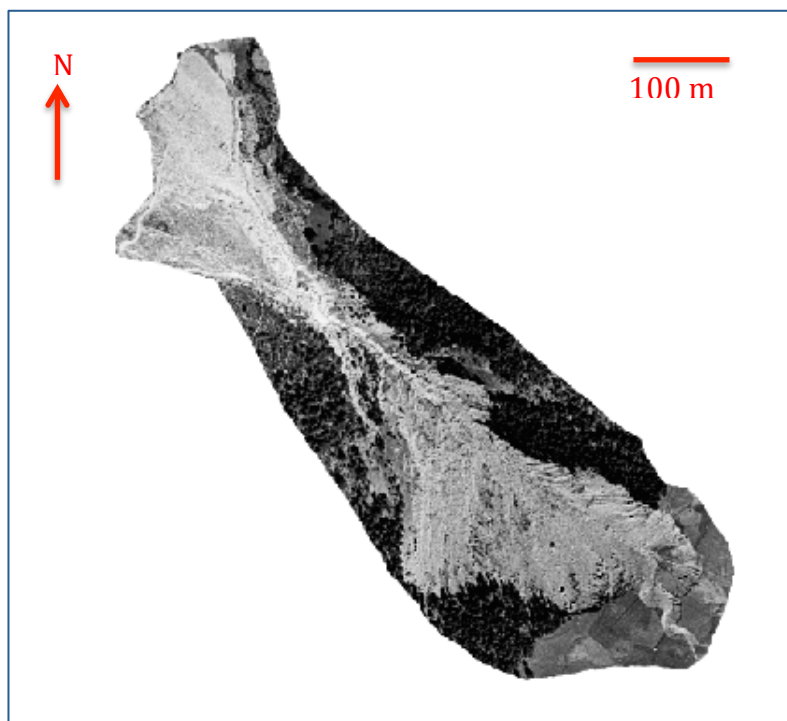


Figura 10. Ortofotografía de la Cuenca Torrencial El Rebaixader, 1957. (Fuerza aérea española, facilitada por la UPC).

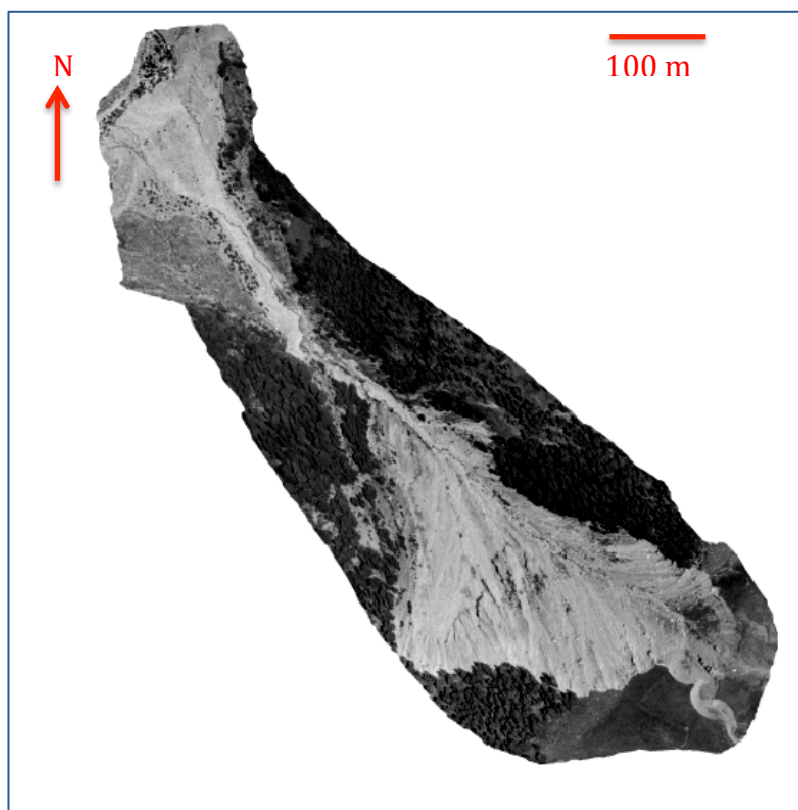


Figura 11. Ortofotografía de la Cuenca Torrencial El Rebaixader, 1975. (ICGC, facilitada por la UPC).

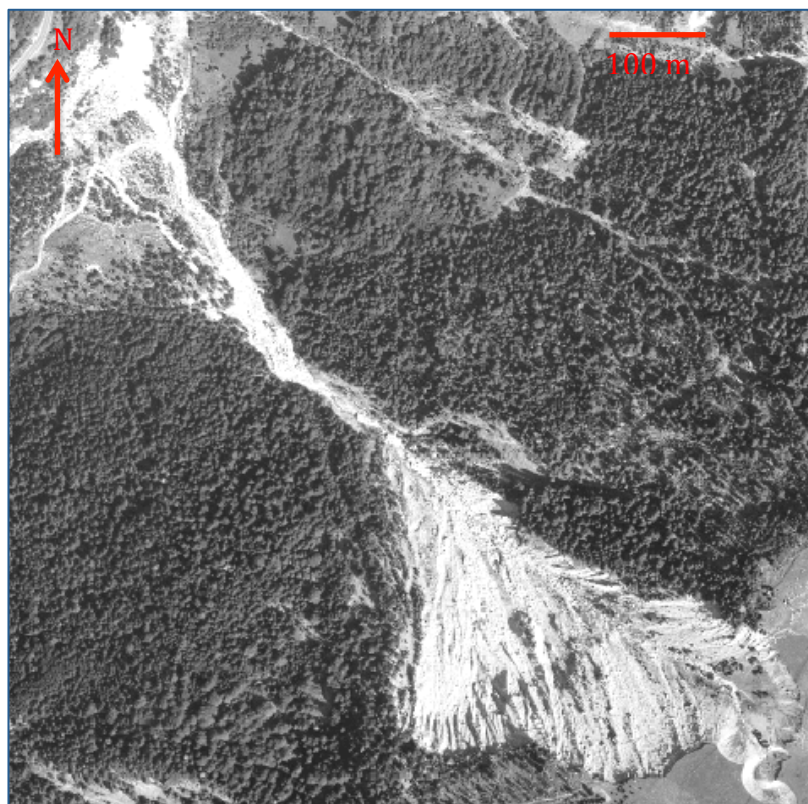


Figura 12. Ortofotografía de la Cuenca Torrencial El Rebaixader, 1992. (ICC, actual ICGC, facilitada por la UPC).

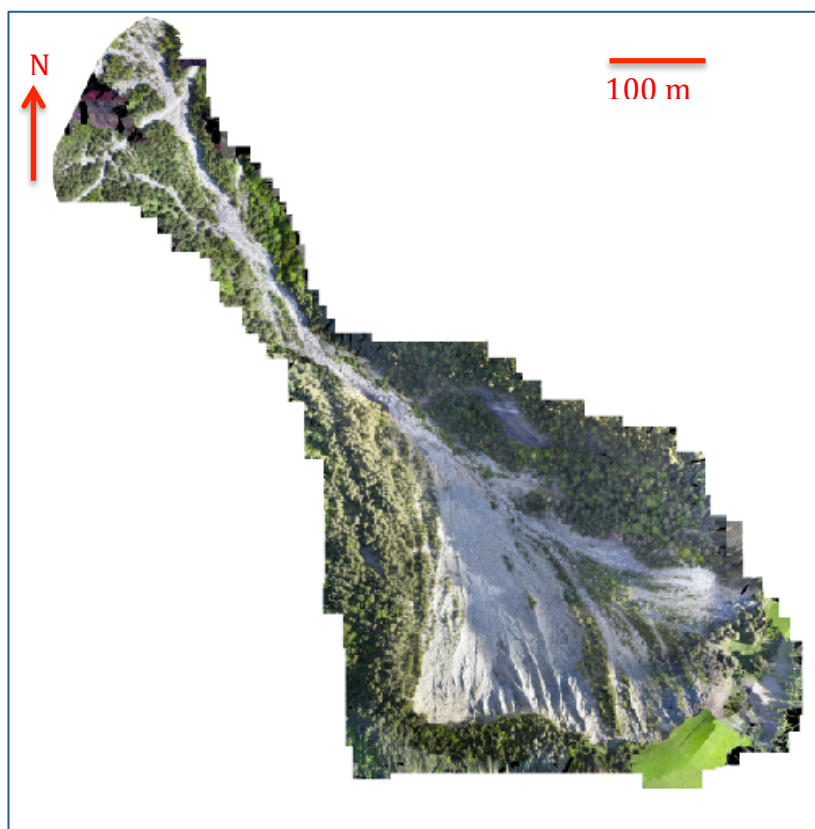


Figura 13. Ortofotografía de la Cuenca Torrencial El Rebaixader, 2016 (Dron UPC, facilitada por la misma).

Una vez expuestas las ortofotografías, vemos que la mayoría de ellas están parcialmente cortadas, dato que tendremos en cuenta a la hora de analizarlas.

Fecha	Técnica Aplicada	Escala y fuente de la fotografía aérea	Tamaño de celda resultante de MDE (m)
12/09/1946	DP-HAP	1:43500 (Fuerza aérea Española)	2
20/08/1957	DP-HAP	1:33000 (Fuerza aérea Española)	2/5
14/07/1975	DP-HAP	1:18000/20000 (ICGC)	2/5
17/08/1992	DP-HAP	1:22000 (ICGC)	2
01/06/2016	DP-UAV	Vuelo dron propio (grupo UPC)	0,1/0,5/2

Tamaño de celda en ortofotografía (m)	Comentarios
0,5/1	Fotografía de buena calidad. (Autor: Felipe. Vuelo de Septiembre de 1946 según IGN)
0,5/1	Fotografía de calidad media
0,5	Fotografía de calidad media y cono de deyección parcialmente cortado
0,5	Fotografía de buena calidad
0,02/0,2/0,5	Fotografía de buena calidad pero incompleta

Tabla 2. Datos sobre las ortofotografías utilizadas.

Por otra parte, para cada una de las ortofotografías anteriores (excepto 1957), tenemos un modelo digital de elevación de la misma (MDE), representación visual de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, los cuales complementaran nuestro trabajo y proporcionaran resultados más exactos.

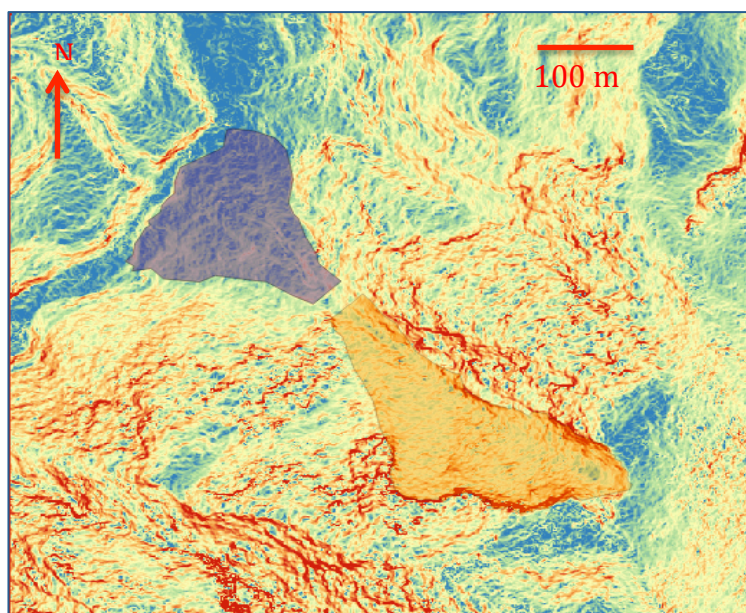


Figura 14. MDE de 1946, cono (lila) y escarpe (naranja). (Sin datos, facilitada por la UPC).

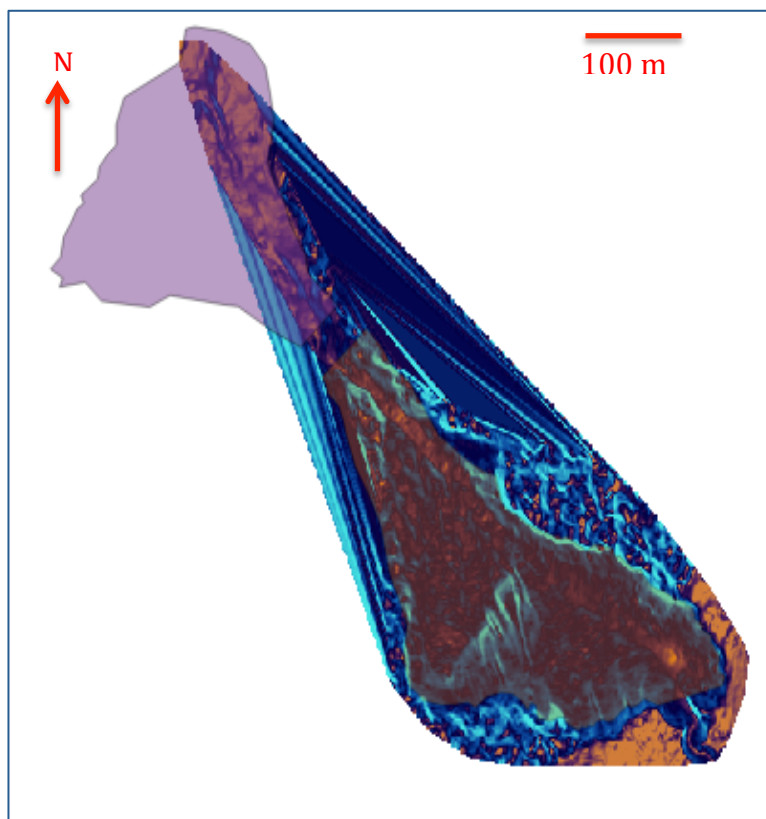


Figura 15. MDE de 1975, cono (lila) y escarpe (naranja) (Sin datos, facilitada por la UPC).

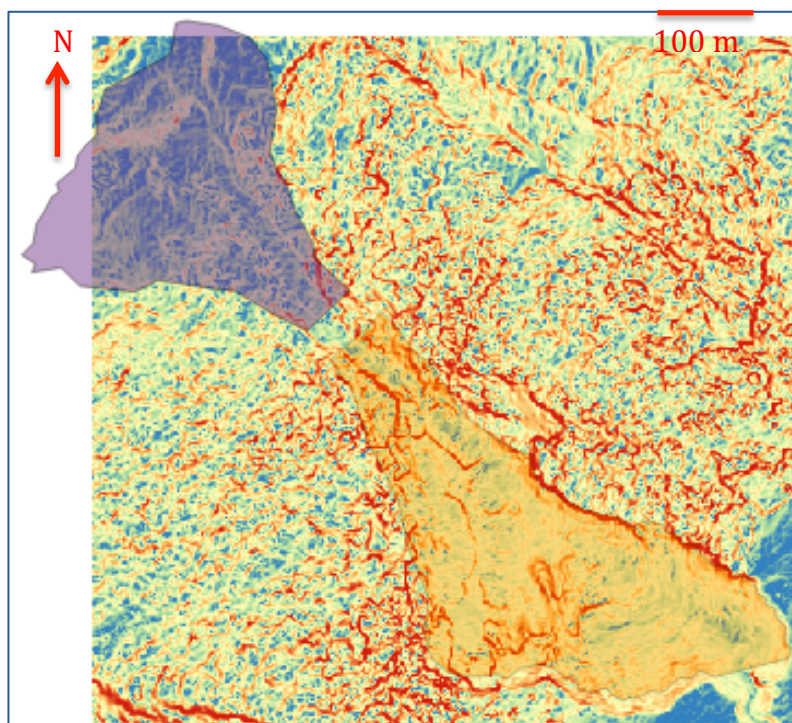


Figura 16. MDE de 1992, cono (lila) y escarpe (naranja) (Sin datos, facilitada por la UPC).

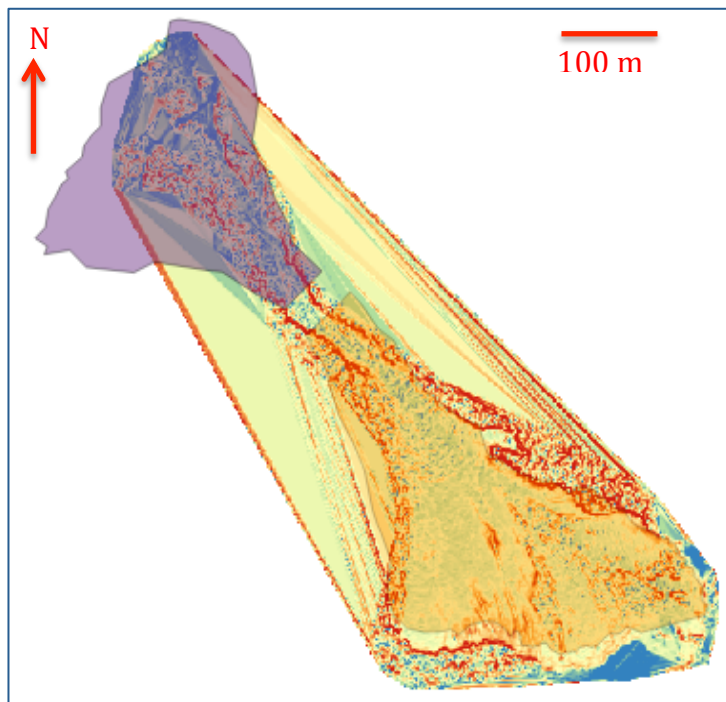


Figura 17. MDE de 2016, cono (lila) y escarpe (naranja) (Sin datos, facilitada por la UPC).

Como se aprecia en las ilustraciones anteriores, los MDE no son completos y tienen defectos en ciertas zonas, pero como se ha usado básicamente para definir la línea de escarpe, estos defectos no han repercutido en el desarrollo del análisis.

Finalmente, con el propósito de calcular la cantidad volumétrica erosionada se ha llevado a cabo el análisis mediante perfiles topográficos (con QGIS), de esta manera se estima la longitud de la aproximación geométrica con la que se calculará el volumen total, como se verá en los próximos apartados.

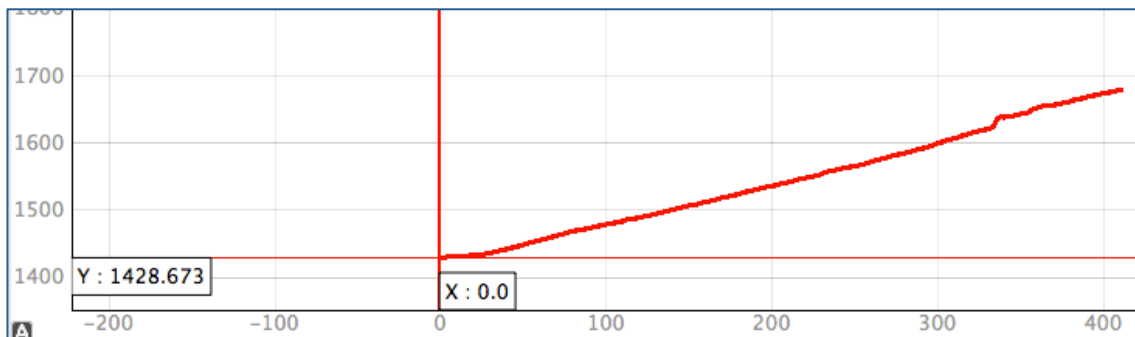


Figura 18. Ejemplo de Perfil Topográfico (m).

*Perfil topográfico realizado según la línea azul de la Figura 36

4.2 Análisis del suelo y escarpe mediante QGIS

El análisis y estudio de la presente tesina se ha llevado a cabo mediante el programa QGIS, de tal manera que en este apartado, en primer lugar se va a introducir el mismo, para seguidamente desarrollar de manera detallada las fases o etapas que han tenido lugar hasta llegar a los resultados finales.

4.2.1 Introducción

El programa QGIS (de código libre para plataformas GNU/LINUX, Unix, Mac OS, Microsoft Windows y Android) es un Sistema de Información Geográfica (SIG), se trata de un conjunto de herramientas que integra y relaciona diversos componentes que permiten la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización de grandes cantidades de datos procedentes del mundo real, vinculados a una referencia espacial.

Permite el manejo tanto de formatos ráster como vectoriales a través de bibliotecas GDAL y OGR (bibliotecas de software para la lectura y escritura de formatos geoespaciales). Algunas de sus características son:

- Manejo de archivos vectoriales Shapefile, ArcInfo coverages, Mapinfo, GRASS GIS etc.

- Soporte para un importante número de tipos de archivos ráster.

Una de las mayores ventajas de este programa es la posibilidad de usar Quantum GIS como GUI del SIG GRASS, utilizando así toda la potencia de análisis.

Por otra parte, QGIS está desarrollado en C++ (lenguaje de programación), usando la biblioteca Qt para su interfaz gráfica de usuario. Además, permite la integración de plugins desarrollados tanto en C++ como en Python.

4.2.2 Desarrollo

Expuesto el programa QGIS, se detallará ampliamente qué se ha hecho y cómo se ha hecho con el mismo. Para ello se divide el estudio en dos bloques, uno relacionado con la evolución del escarpe del movimiento de masa y otro con la vegetación presente sobre el terreno afectado por dicho movimiento. De esta manera, también dividiremos este apartado en los dos bloques diferentes con el objetivo de tener una mayor y mejor comprensión del proceso seguido, obteniendo resultados independientes entre sí sobre un mismo fenómeno.

En cada uno de ellos, aparte de las explicaciones mencionadas, se proporcionarán los criterios y aclaraciones útiles a modo de complemento o adición siempre con la finalidad de clarificar los conceptos.

En primer lugar, introducimos las cinco ortofotografías en el programa y comprobamos que, efectivamente, están georreferenciadas (UTM zone 31N).

-Análisis del suelo

Como la finalidad de este bloque es la de cuantificar y clasificar los diferentes tipos de vegetación presente sobre el terreno afectado por el movimiento de masa, se crean diferentes polígonos, siempre delimitados por un cono y escarpe genéricos. Los clasificaremos en “No vegetación”, donde no haya vegetación, “Prado”, donde la vegetación no sea abundante (Hierba, generalmente), y “Arbustos” en las zonas en la que la vegetación sí sea abundante (de arbustos a árboles y bosques).

El criterio establecido para esta clasificación se basa en la tonalidad de la ortofotografía como consecuencia del reflejo de la luz del sol (1946, 1957, 1975 y 1992) por el hecho de que las fotografías son en blanco y negro. A mayor reflejo de luz solar, menor vegetación, en cambio, a menor reflejo, mayor vegetación. De esta manera, las zonas con tonalidad blanca evidencian falta de vegetación, aquellas regiones grises claras, manifiestan escasa vegetación y finalmente, el terreno con tonalidades grises oscuras o negras, muestran zonas donde la vegetación presente es abundante (*Figuras 19, 20 y 21*).

Por otra parte, la ortofotografía de 2016 es a color, por lo tanto se aprecia nítidamente aquellas zonas sin vegetación, aquellas donde predomina la hierba o prado y aquellas en las que abundan arbustos y árboles (*Figuras 22, 23 y 24*).

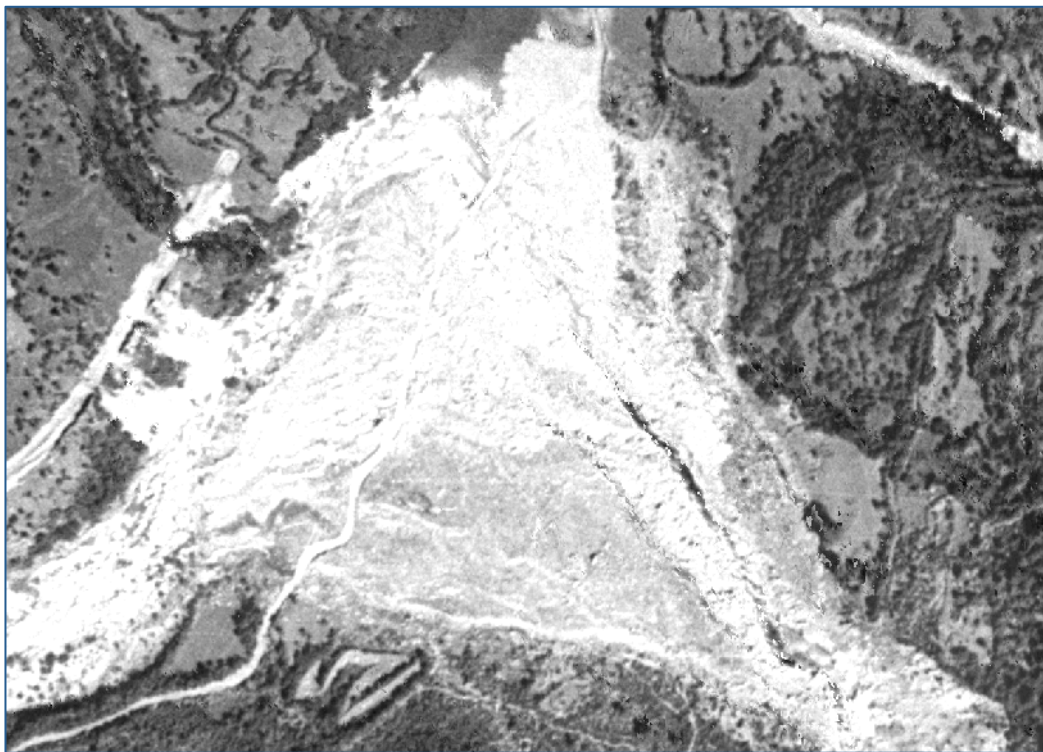


Figura 19. Ejemplo de tonalidades de grises según el reflejo solar sobre el cono del movimiento de masa (Referencias en Tabla 2).

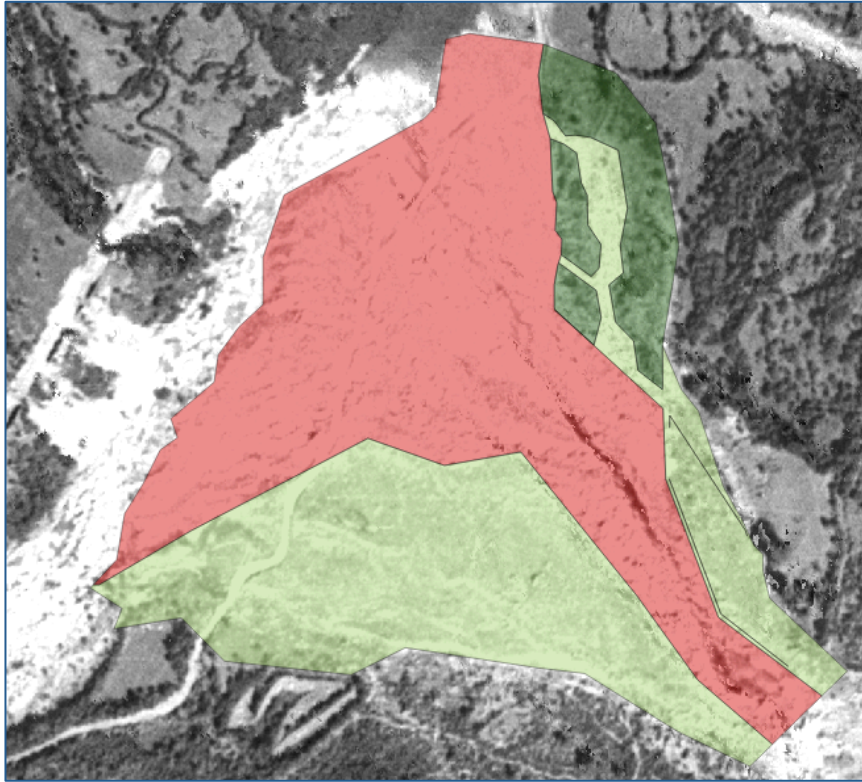


Figura 20. Ejemplo de clasificación del cono mediante polígonos según la tonalidad de grises.
(Referencias en Tabla 2).

Rojo - No vegetación
abundante

Verde claro - Vegetación escasa

Verde oscuro – Vegetación abundante

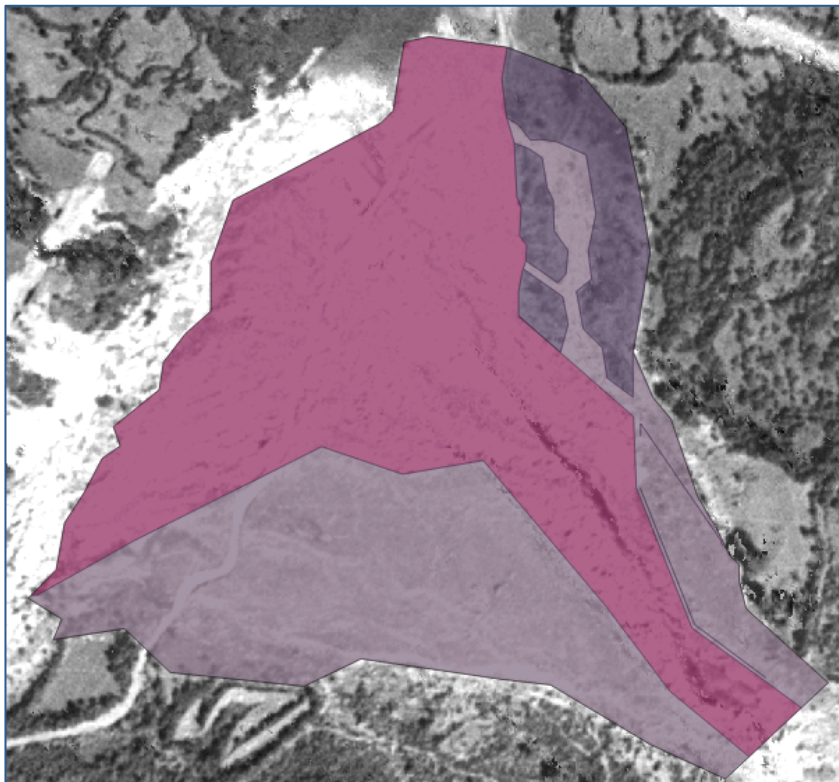


Figura 21. Los polígonos clasificatorios siempre quedan delimitados por el polígono genérico tanto del cono como del escarpe (Referencias en Tabla 2).



Figura 22. Ejemplo de ortofotografía a color (Referencias en Tabla 2).

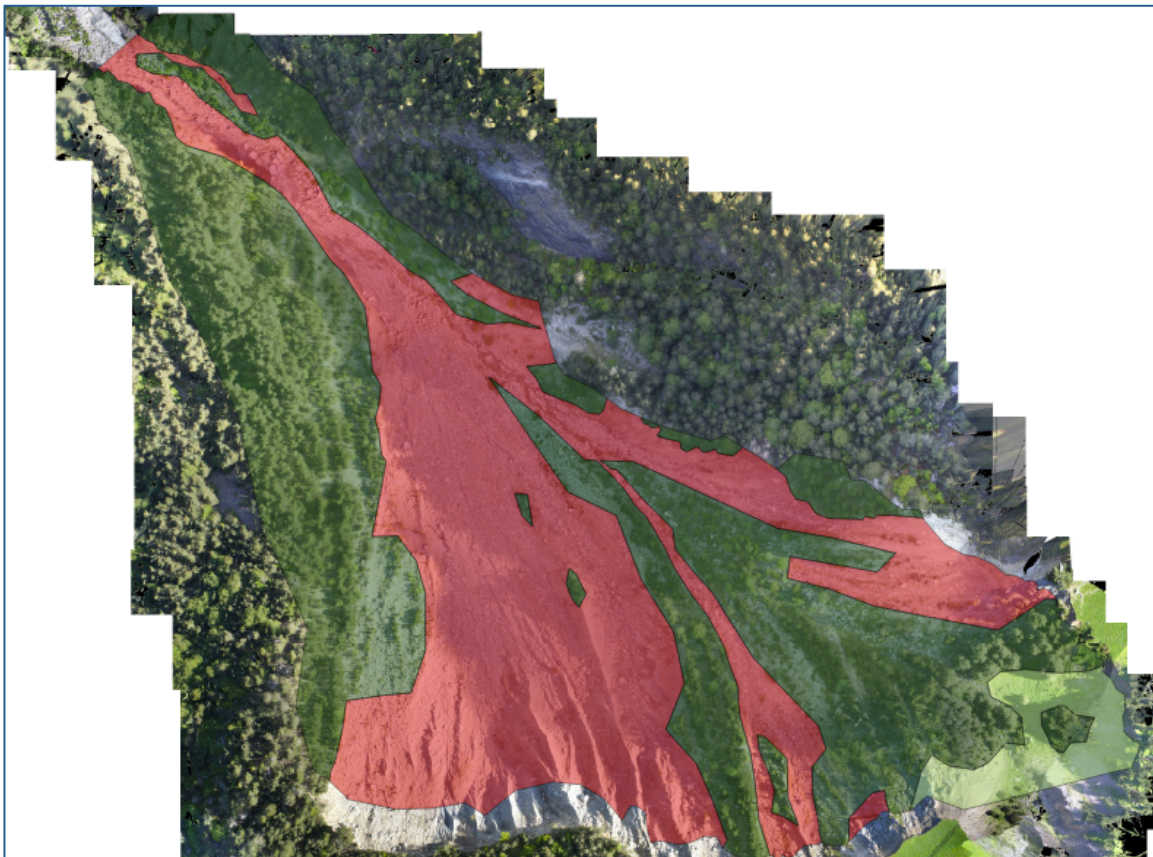


Figura 23. Ejemplo de clasificación del escarpe mediante polígonos su tonalidad.
 Rojo - No vegetación Verde claro - Vegetación escasa Verde oscuro – Vegetación

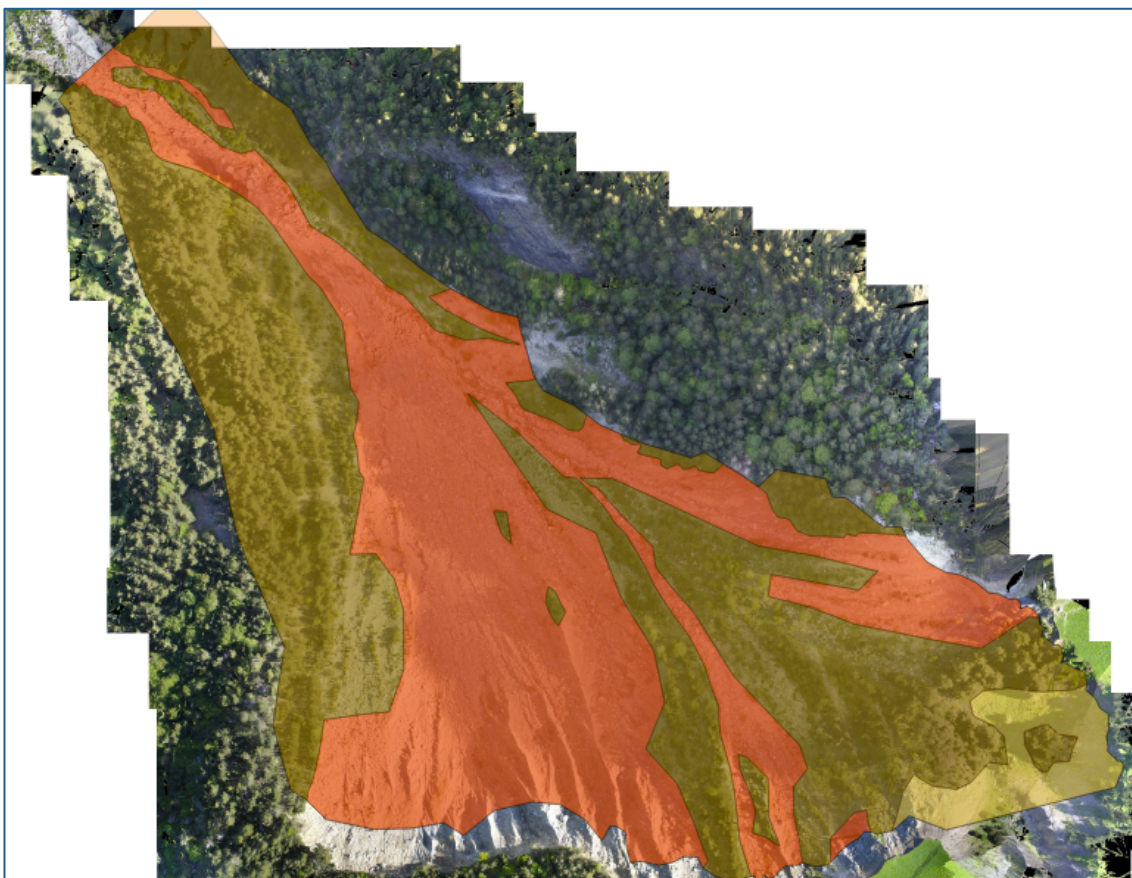


Figura 24. Los polígonos clasificatorios siempre quedan delimitados por el polígono genérico tanto del cono como del escarpe.

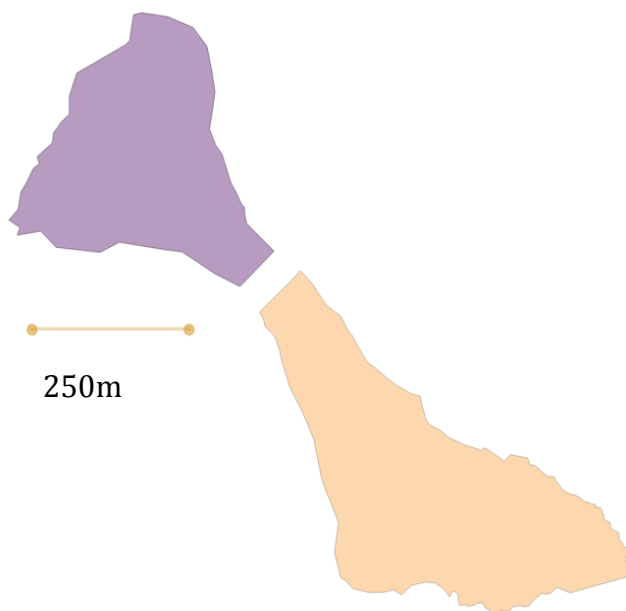


Figura 25. Polígonos representativos del cono (lila) y del escarpe (naranja).

De este modo, llevándolo a cabo con el cono y el escarpe de todas las 5 ortofotografías, queda caracterizada el área, con la que, mediante análisis estadísticos, obtendremos resultados de cómo ha evolucionado la vegetación sobre esta zona a lo largo de los 70 años.

El contacto entre polígonos no es exacto, ya que, aunque sea mínima, la distancia entre ellos nunca llegará a 0. Por ese motivo, para cuantificar el error cometido, de cada una de las ortofotografías se ha medido cierto número de distancias entre polígonos suficientemente representativas para poder estimar dicho error (*Figura 26*).

El resultado obtenido es que la separación media entre polígonos es menor al milímetro, por lo tanto, al tratarse de una zona de más de 1 km de longitud, el error cometido, en este caso, es menor al 1%.

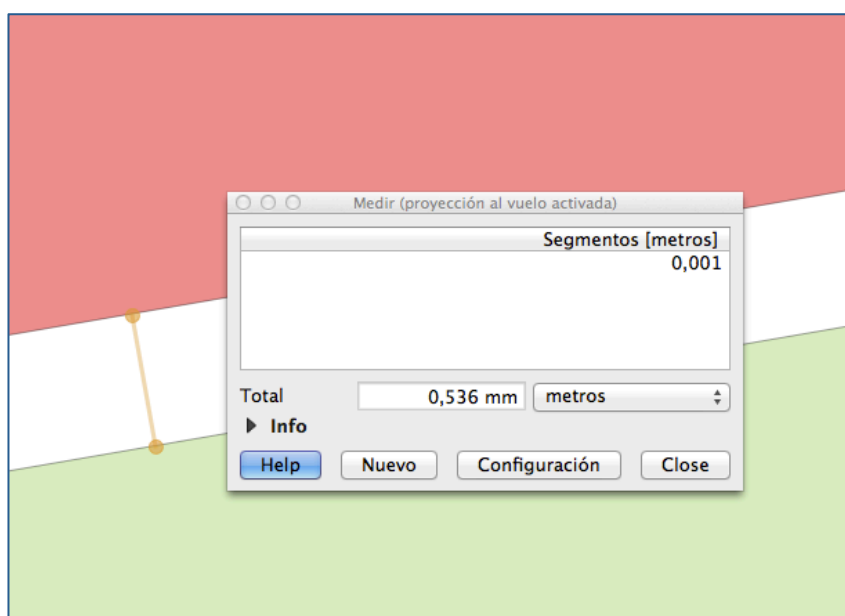


Figura 26. Una de las medidas de separación entre polígonos clasificatorios.

-Análisis del escarpe

Por otra parte, también con el programa QGIS, se ha estudiado cómo ha evolucionado el escarpe mediante líneas y polígonos.

El objetivo de este análisis es el de poder cuantificar la cantidad volumétrica de terreno erosionado a lo largo de estos 70 años, para ello, se ha definido para cada una de las ortofotografías una línea delimitando el escarpe (*Figura 27*).

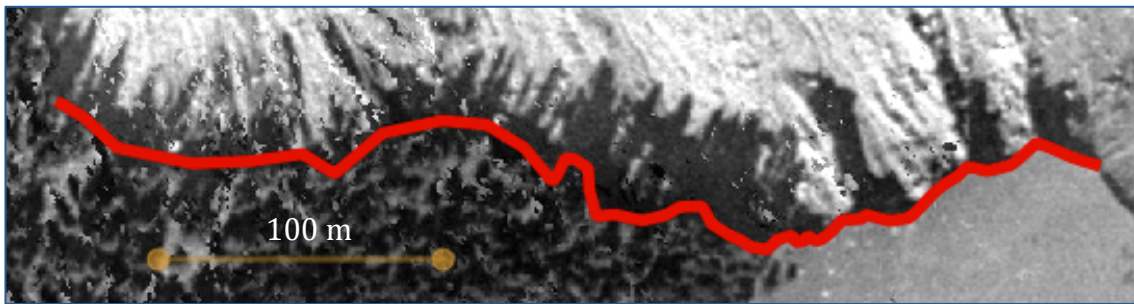


Figura 27. Ejemplo de línea delimitando el escarpe.

De esta manera obtenemos un conjunto de líneas ordenadas de más antigua a más moderna, las cuales, por motivos físicos triviales, nunca llegan a cruzarse (*Figura 28*).

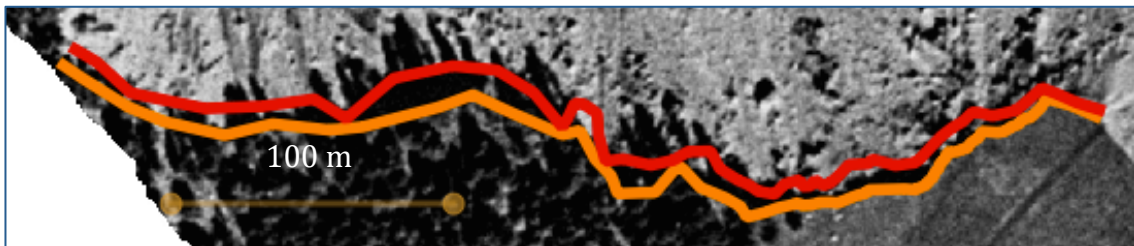


Figura 28. Ejemplo de conjunto de líneas obtenido en la que si el movimiento de masa se encuentra hacia la dirección de la flecha, la línea roja simbolizaría al escarpe más antiguo y la naranja al escarpe más moderno.

Seguidamente, se ha definido polígonos delimitados por cada una de las líneas anteriores, pudiendo calcular de esta manera el área contenida entre líneas, que simboliza el área erosionada entre el intervalo de años comprendidos entre el año de la ortofotografía más antigua y la más moderna (*Figura 29*).

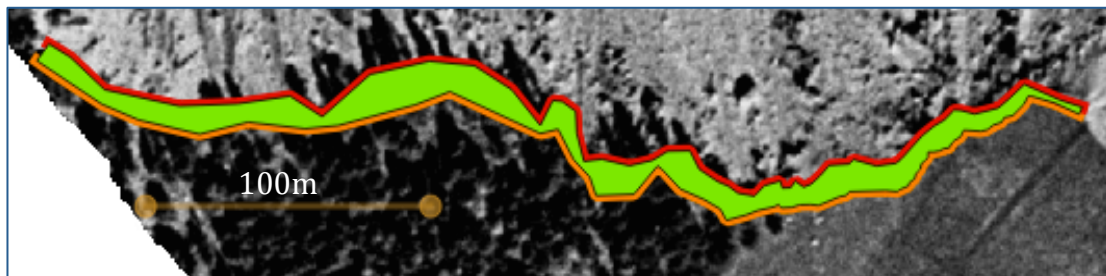


Figura 29. En verde, el polígono representativo del área comprendido entre las líneas (escarpes) anteriores.

Finalmente, realizando este proceso con todas las ortofotografías disponibles, obtendremos la totalidad del área erosionada desde el 1946 hasta la actualidad.

Una vez obtenido el área erosionada, mediante perfiles topográficos y aproximaciones geométricas, podremos estimar la integridad de la cantidad volumétrica erosionada.

El criterio seguido para la determinación de la posición de la línea se fundamenta en el cambio radical de tonalidad, simbolizando la zona erosionada (color claro) y la zona sin erosionar (color oscuro) teniendo en cuenta la posible sombra sobre la zona erosionada causada por la vegetación de la zona sin erosionar, motivo por el cual también nos basamos en los MDE para reducir el probable error cometido.

Debido a la diferente resolución de cada uno de los MDE (más antiguo, menor resolución), dicho error se estimará independientemente para cada ortofotografía o MDE, el cual será menor cuanto más reciente sea.

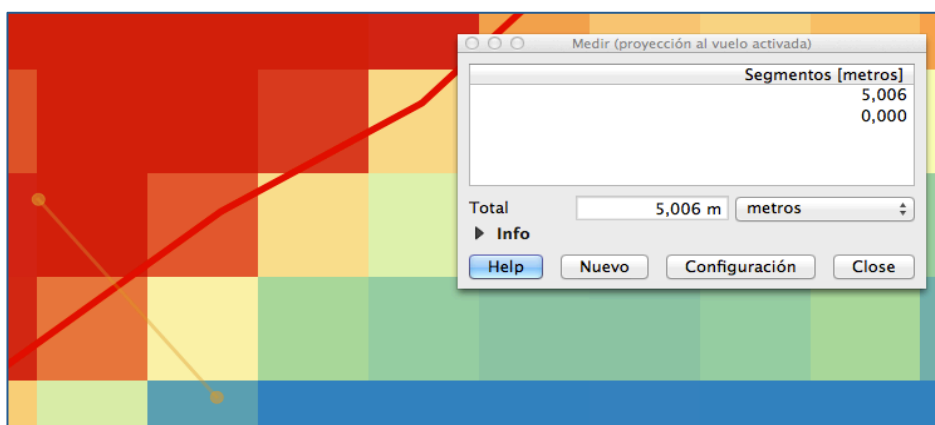


Figura 30. Error en la medición del escarpe, 1946.

El error cometido en la medición del escarpe de la ortofotografía de 1946 es de $\pm 2,5m$.

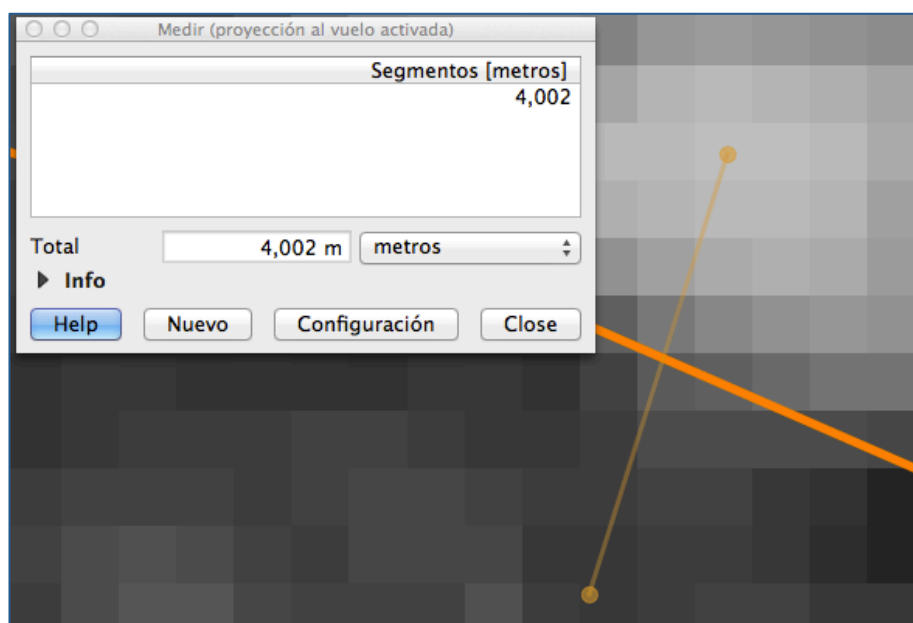


Figura 31. Error en la medición del escarpe, 1957.

En el escarpe de 1957, el error cometido es de $\pm 2m$.

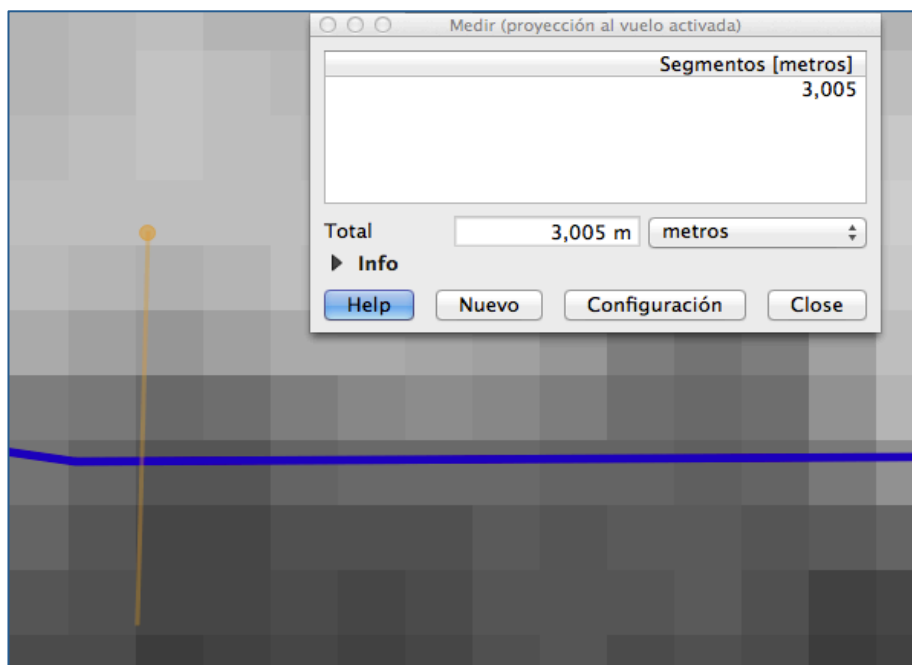


Figura 32. Error en la medición del escarpe, 1975.

Como es de esperar, el error de 1975 es menor que los anteriores, $\pm 1,5m$.

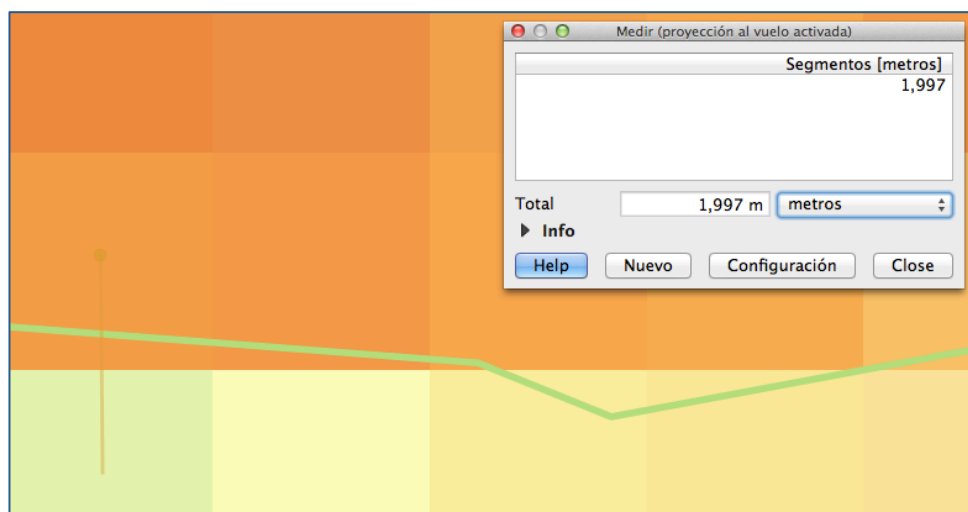


Figura 33. Error en la medición del escarpe, 1992.

El error cometido en la medición del escarpe de 1992 es de $\pm 1m$.

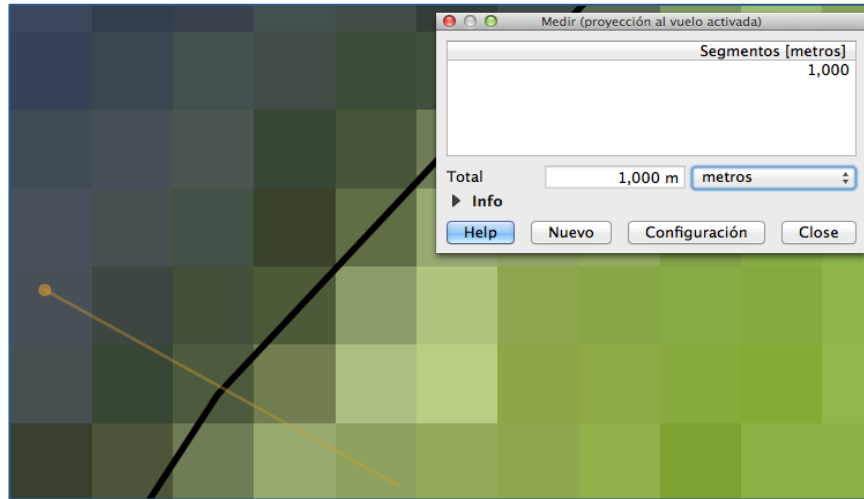


Figura 34. Error en la medición del escarpe, 2016.

Finalmente, en 2016 se comete el mínimo error, $\pm 0,5m$.

Como se ha podido apreciar, la resolución de los MDE de esta zona a lo largo de 70 años ha mejorado considerablemente, pasando de $\pm 2,5m$ en 1946 a $\pm 0,5m$, por lo tanto, es de esperar que en los próximos años la exactitud de las mediciones aumente más si cabe.

Para obtener el volumen total erosionado, utilizaremos la aproximación geométrica de un triángulo (Figura 35), con lo que debemos definir la longitud L.

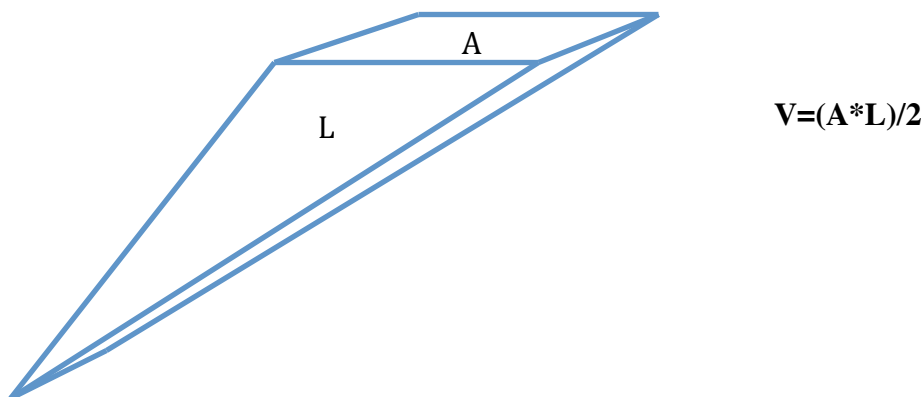


Figura 35. Aproximación geométrica del volumen del escarpe erosionado.

Como se ha explicado, esta longitud L se ha aproximado analizando los perfiles topográficos de las cinco ortofotografías desde 3 posiciones diferentes, siguiendo siempre la línea de máxima pendiente (*Figura 36*). Se ha decidido realizar 3 perfiles topográficos distintos ya que, analizando los polígonos anteriores representativos del área erosionada, se aprecia que la erosión no es uniforme a lo largo del escarpe, hay zonas más erosionadas que otras. De esta manera, realizando la media aritmética entre las 3 mediciones, el resultado de L es considerablemente más exacto que el obtenido con 1 ó 2 perfiles.

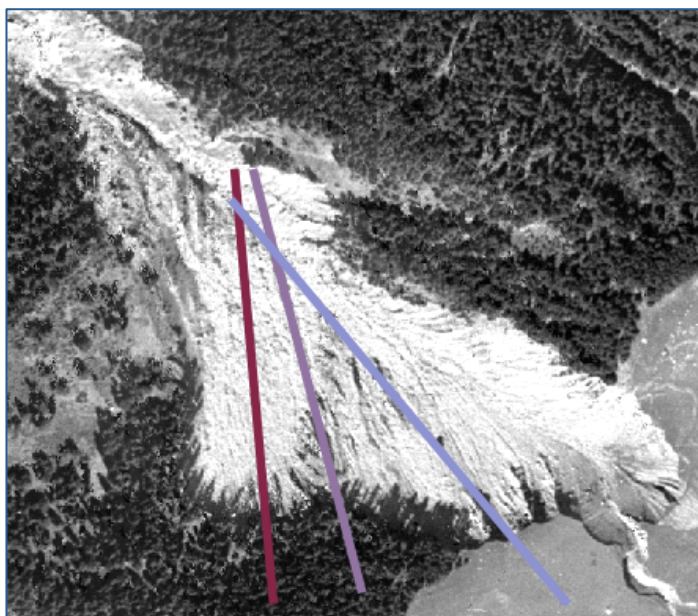


Figura 36. Posición de los 3 perfiles topográficos.

El criterio para la determinación de L según los perfiles topográficos es físico, se basa en sobreponer los 5 perfiles de cada ortofotografía desde la misma posición y observar en qué punto se unifican. La representación física de este fenómeno reside en que cuando los perfiles no están unificados o no siguen una topología similar implica que el perfil con topología más elevada es el perfil más antiguo mientras que el de topología menor es el más moderno, mientras que cuando se unifican, o se aproximan a una unificación, dejamos de estar en zona afectada por la erosión del escarpe (*Figura 37*). Esa distancia representa la longitud en línea recta, por lo tanto, mediante trigonometría, encontramos la L real.

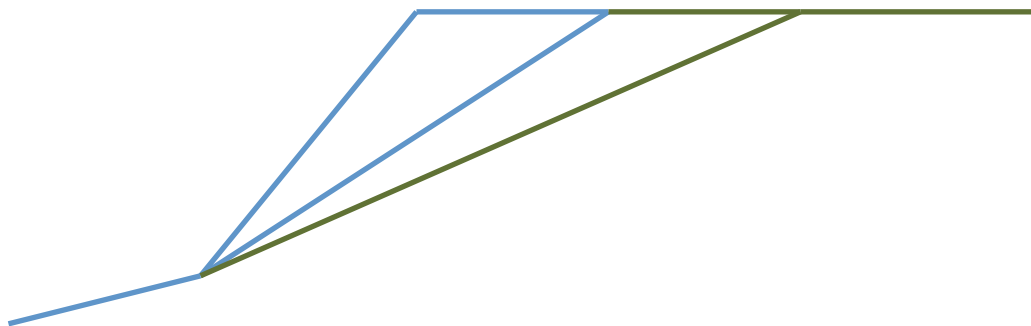


Figura 37. Representación gráfica de la mecánica de erosión del escarpe. En azul terreno mas antiguo (ya erosionado) y verde más moderno.

4.3 Meteorología

Por lo que respecta a la meteorología del lugar (Senet) y su análisis, la UPC facilitó un archivo (formato Excel) que recoge la precipitación diaria desde el 1 de Enero de 1924 hasta el 31 de Diciembre de 2016.

Las mediciones se llevaron a cabo mediante diferentes estaciones meteorológicas, según la fecha en que fueron tomadas. Estas estaciones son las siguientes:

-Estación meteorológica Vilaller (Senet), la cual tiene las siguientes características:

ALTITUD (m)	LONGITUD (ETRS89)	LATITUD (ETRS89)
1310	0,82493	42,3238

Tabla 3. Características Estación meteorológica Vilaller.

-Estación meteorológica Boí Central,

ALTITUD (m)	LONGITUD (ETRS89)	LATITUD (ETRS89)
2535	0,88405	42,46602

Tabla 4. Características Estación meteorológica Boí Central.

Estas dos estaciones meteorológicas son desde las cuales se tomaron los datos desde el 1924 hasta el 1998, alternándose entre sí durante diferentes intervalos temporales.

A partir de 1998 hasta la última medición tomada, en 2016, la estación meteorológica encargada fue:

-Estación meteorológica de Pont de Suert (Alta Ribagorça),

ALTITUD (m)	LONGITUD (ETRS89)	LATITUD (ETRS89)
843	0,74362	42,39822

Tabla 5. Características Estación Meteorológica de Pont de Suert.



Figura 38. Estación meteorológica de Pont de Suert (Fuente: inspontdesuert.com).

En nuestro caso, usaremos las medidas comprendidas entre el 1 de Enero de 1946 hasta el mismo 31 de Diciembre de 2016.

A partir de estas precipitaciones, se han elaborado diferentes tablas y gráficos en los cuales se clasifican y caracterizan todos los datos, facilitando su análisis y comparación.

El objetivo principal es entender cuánto y cómo ha llovido durante los 70 años, determinar qué tipo de lluvia ha sido la más frecuente, si la lluvia poco intensa pero extensa en el tiempo o por el contrario la precipitación breve en el tiempo pero muy intensa, es decir, las lluvias torrenciales.

Como se ha explicado, la importancia de conocer el comportamiento de la precipitación reside en el hecho de que la finalidad del presente proyecto es la de relacionar la erosión durante estos años con los efectos producidos por el conocido cambio climático, el cual estipula un aumento de las lluvias torrenciales, principales causantes de las erosiones del tipo de escarpe estudiado en nuestra zona.

Para ello se ha elaborado una tabla que proporciona el valor de cuantos días se ha superado una cierta precipitación crítica (P_c) por año.

En este caso, se ha marcado 3 P_c diferentes, 30mm, 35mm y 40mm.

Por otra parte, se ha elaborado una segunda tabla donde se muestra el promedio de cuantos días se ha superado los P_c anteriores a lo largo de un año en décadas. De esta manera, analizando los dos gráficos resultantes, se podrá determinar la conducta de la precipitación desde el 1946 al 2016.

Por último, debido a un problema de recepción de datos, desde el 1966 hasta el 1986 no se han obtenido las precipitaciones. Si bien se reflejará en los resultados, no influirá en su comprensión y conclusiones.



Figura 39. Posición geográfica de las diferentes estaciones meteorológicas.

En azul – Boí central

En amarillo – Vilaller

En rojo – Pont de Suert

5. RESULTADOS, ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

Después de definir la metodología y los criterios utilizados para el desarrollo de la presente tesina, en este apartado se van a exponer y discutir los resultados finales obtenidos, utilizando para ello tanto tablas como figuras, con el objetivo de obtener una visión clara y nítida para poder extraer conclusiones suficientemente competentes.

Como se ha hecho en los anteriores apartados, éste también estará dividido, el primer bloque se basará en los resultados obtenidos en el análisis de suelo, en el segundo veremos los resultados referentes a la evolución del escarpe mientras que en el tercer y último apartado se mostrarán los resultados alcanzados en el análisis de los datos procedentes de la meteorología.

Finalmente, se expondrán las conclusiones globales según los resultados obtenidos en este apartado.

-Resultados obtenidos en el análisis del suelo

En primer lugar veremos figuras de cada una de las ortofotografías con los polígonos clasificatorios sobreimpresionados según la naturaleza de la zona. De esta manera, mediante análisis visual, podremos empezar a entender los cambios morfológicos sufridos en este territorio a lo largo de 70 años.

Seguidamente, estudiando el área de los polígonos, se analizará mediante tablas y figuras cuál ha sido exactamente la evolución morfológica de la zona en estos años.

Finalmente, una vez expuestas las figuras y los gráficos, se analizarán y discutirán.

Aunque en las figuras siguientes se muestren tanto cono como escarpe, en el estudio de las áreas se ha analizado por cada figura por separado, ya que la evolución en ambos lados no es la misma. De este modo, los resultados numéricos obtenidos en las tablas son más exactos.

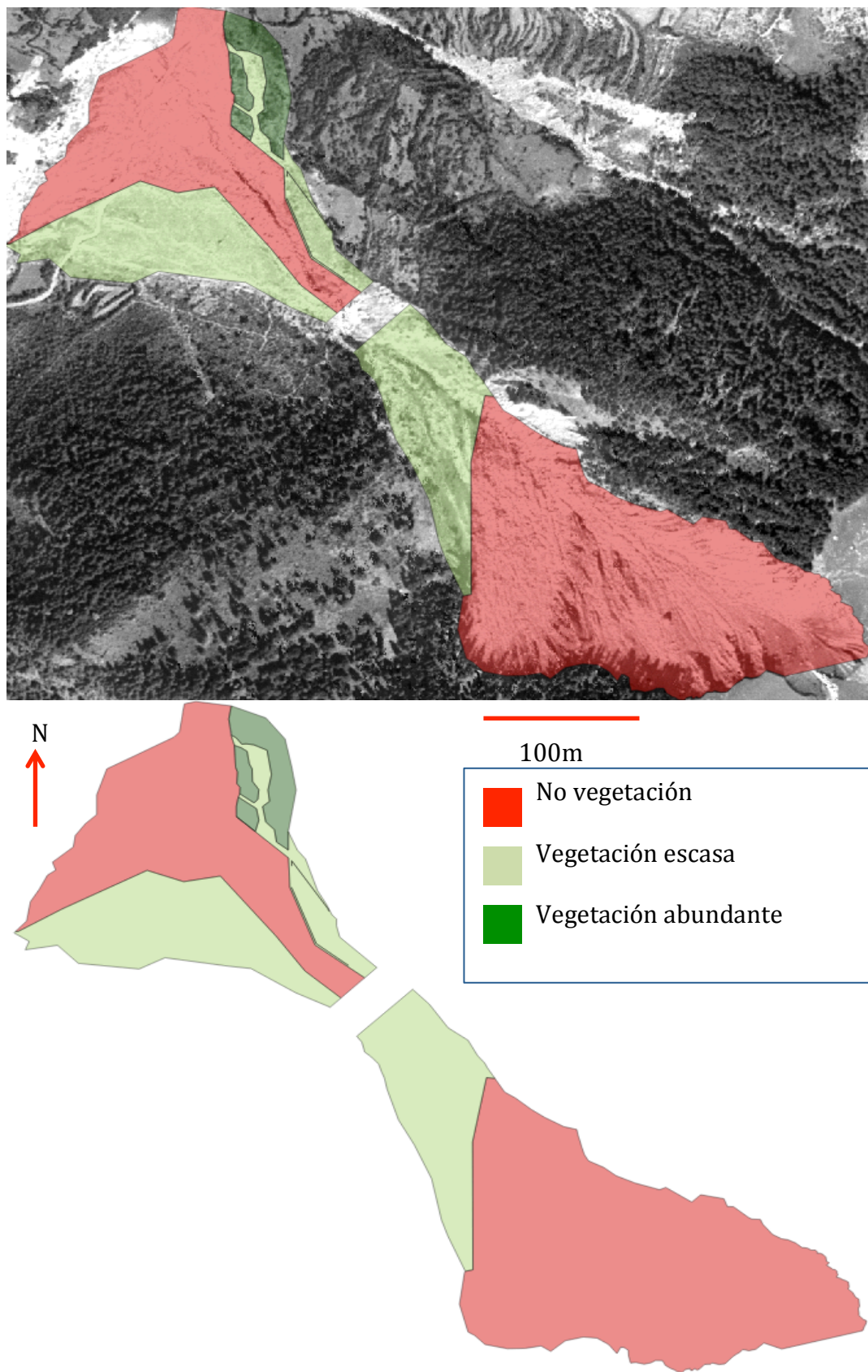


Figura 40. Análisis del suelo mediante polígonos, 1946.

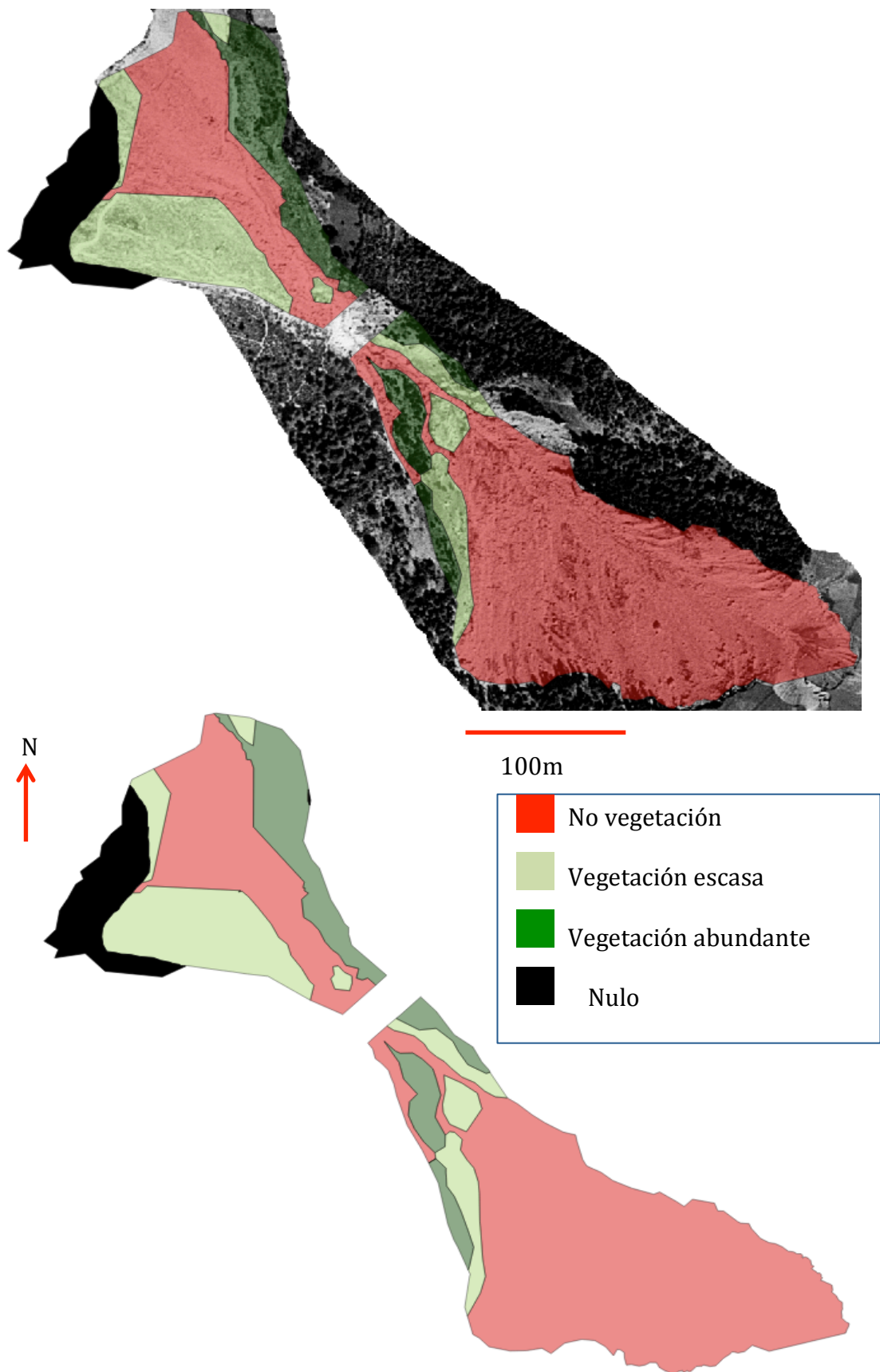


Figura 41. Análisis del suelo mediante polígonos, 1957.

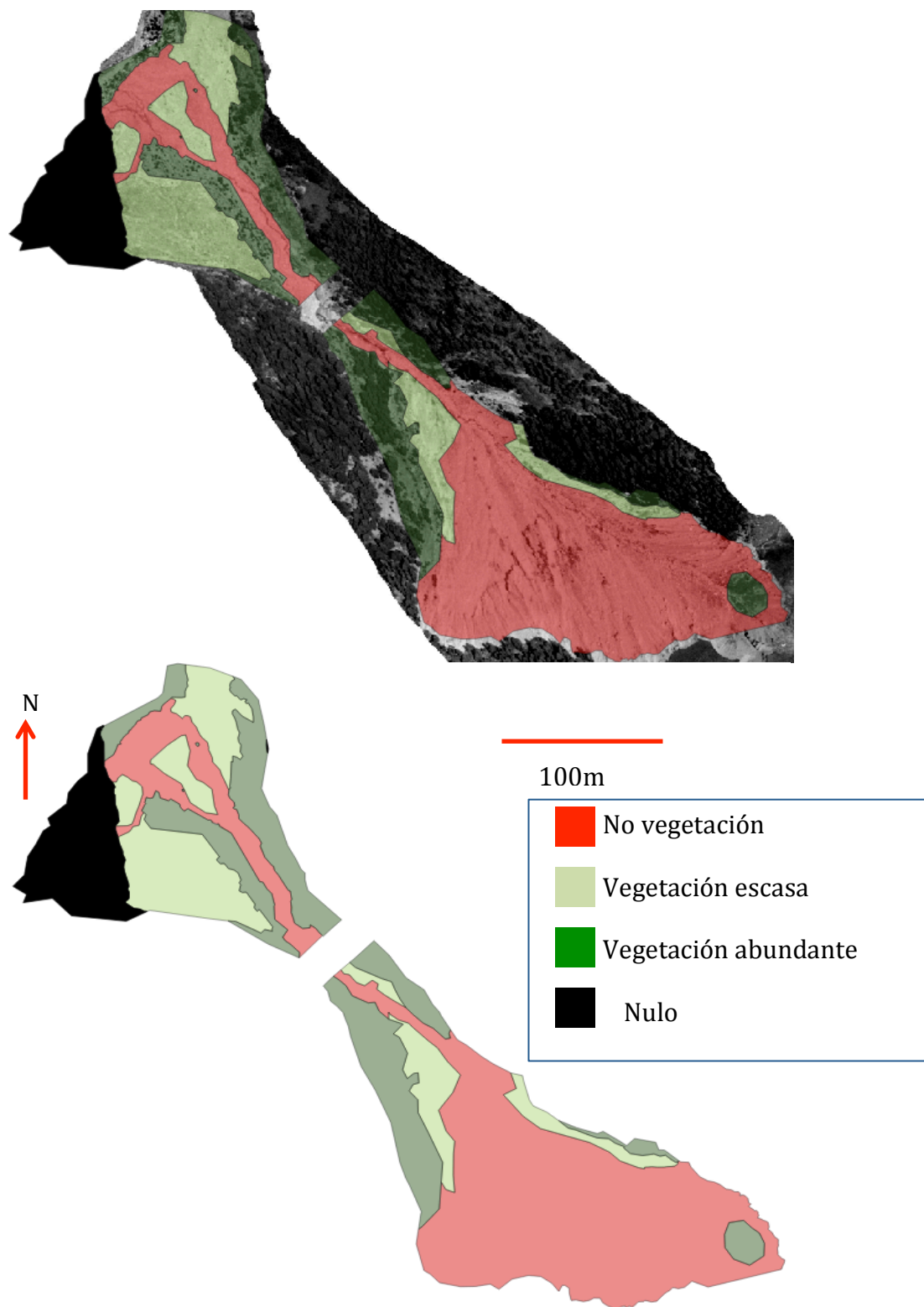


Figura 42. Análisis del suelo mediante polígonos, 1975.

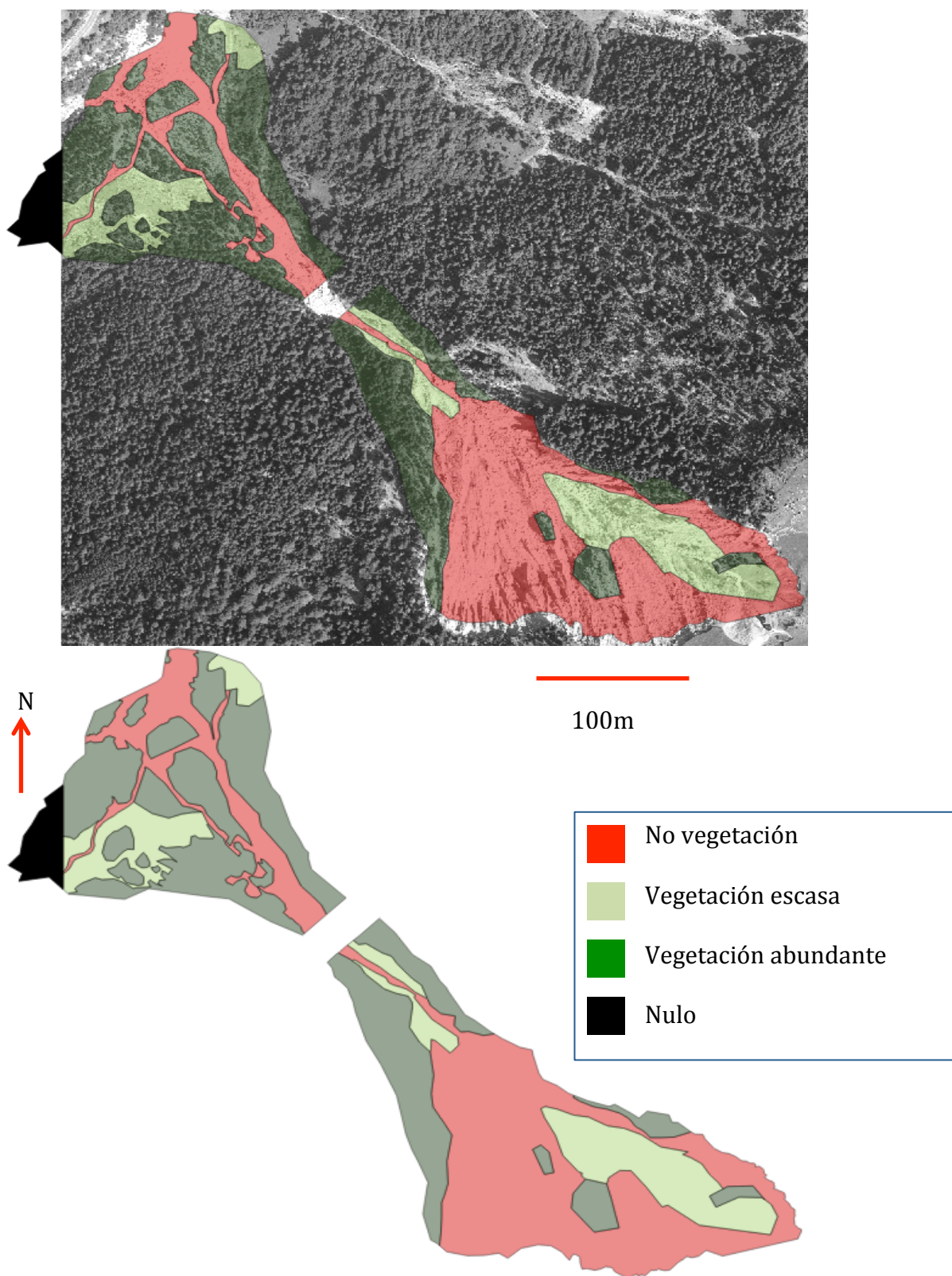


Figura 43. Análisis del suelo mediante polígonos, 1992.

Rojo – No vegetación
abundante

Verde claro – Vegetación escasa

Verde oscuro – Vegetación

Negro - Nulo

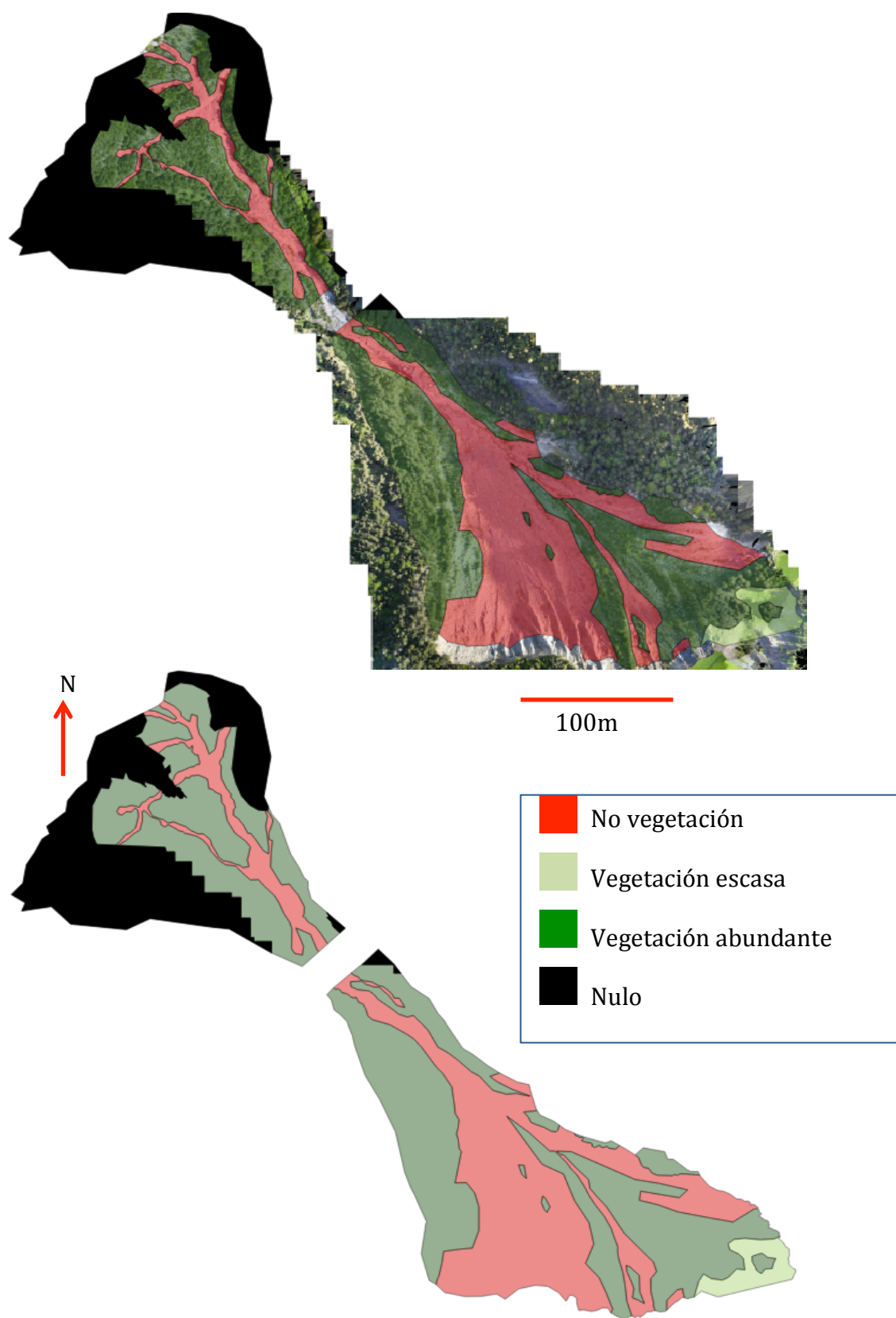


Figura 44. Análisis del suelo mediante polígonos, 2016.

A continuación, caracterizaremos el área de los polígonos anteriores, dando los resultados tanto en m² como en porcentajes, con tal de entender las dimensiones de éstos y la proporción de cada grupo de vegetación respecto a la totalidad del territorio.

Cono

CONO	No vegetación (m ²)	Prado (m ²)	Arbustos (m ²)	Nulo (m ²)
1946	45797	35429	7301	0
1957	33229	25221	15778	14304
1975	16672	28989	23216	19662
1992	20771	12919	49588	5250
2016	10629	0	34635	43271

Tabla 6. Distribución de la vegetación sobre el cono (en m²).

CONO	No vegetación (%)	Prado (%)	Arbustos (%)	Nulo (%)
1946	52	40	8	0
1957	38	28	18	16
1975	19	33	26	22
1992	23	15	56	6
2016	12	0	39	49

Tabla 7. Distribución de la vegetación sobre el cono (en %).

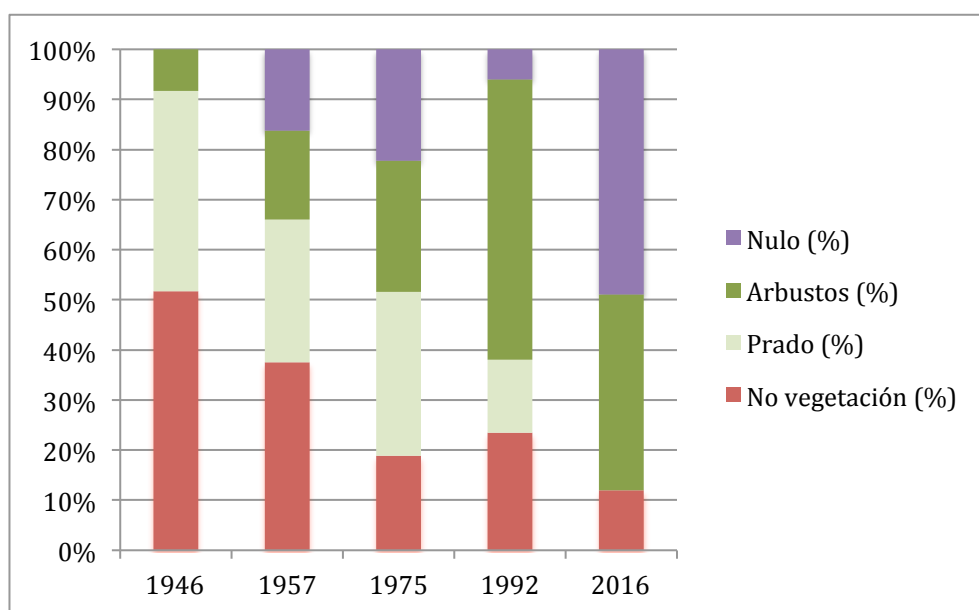


Figura 45. Gráfico sobre la distribución de vegetación sobre el cono (en %).

Como vemos, en el gráfico anterior interviene el término “nulo”, el cual representa aquella zona incluida dentro del cono genérico, pero sin datos por ortofotografía incompleta.

Examinando cada uno de los conos, se puede deducir fácilmente que, generalmente, el territorio determinado como nulo puede tratarse de vegetación abundante (verde oscuro), no obstante, se mantendrá como nulo.

Con el objetivo de que este valor “nulo” no interfiera en la comprensión de los resultados, en el siguiente gráfico se ha omitido.

CONO	No vegetación (%)	Prado (%)	Arbustos (%)
1946	52	40	8
1957	45	34	21
1975	24	42	34
1992	25	16	60
2016	23	0	77

Tabla 8. Distribución de la vegetación sobre el cono (en % y sin término "nulo").

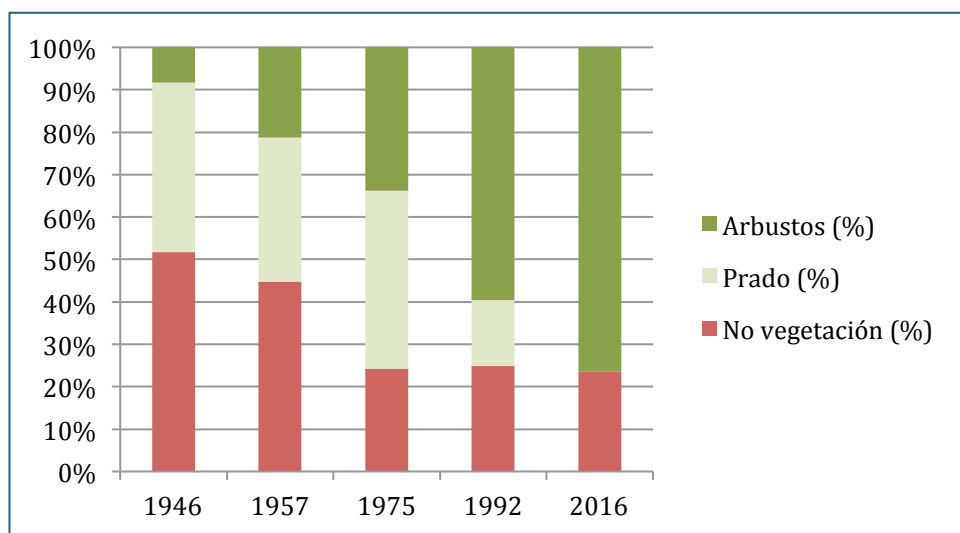


Figura 46. Gráfico sobre la distribución de la vegetación sobre el cono (en % y sin el término “nulo”).

La evolución de la vegetación a lo largo de los años tanto en el *Figura 45* como en el *Figura 46* es bastante notoria.

Se observa que en 1946 predominaba claramente la “No vegetación” con más del 50% de la zona, con un 40% de “Prado” y el 10% restante de “Arbustos”.

En 1957 sigue predominando el territorio sin vegetación (“No vegetación”), aunque ya por debajo del 50%, la vegetación escasa (“Prado”) también disminuye a 30% mientras que la vegetación abundante (“Arbustos”) aumenta a más del 20%.

En los años siguientes la zona “No vegetación” baja y se mantiene aproximadamente con el 25% del territorio, el “Prado” disminuye hasta el 15% en 1992 y a menos del 1% en 2016.

Por otra parte, la vegetación abundante, que en 1946 estaba en 10%, aumente considerablemente hasta llegar a casi el 80% en 2016.

Por lo tanto, inicialmente la mayor parte del cono era “No vegetación”, considerables zonas de vegetación escasa y carente vegetación abundante. Paulatinamente, las zonas de “No vegetación” fueron evolucionando a “Prado”, mientras que el propio prado evoluciona a “Arbustos”. De esta manera, como se ha visto, en 2016 en la mayor parte de la zona predomina la vegetación abundante, con escasa “No vegetación” y “Prado residual”.

No obstante, cabe destacar que la “No vegetación” del mismo 2016, como se puede apreciar en la *Figura 44*, se trata de los canales por donde sigue desplazándose el material erosionado proveniente del Escarpe.

Escarpe

ESCARPE	No vegetación (m ²)	Prado (m ²)	Arbustos (m ²)	Nulo (m ²)
1946	96256	24681	0	0
1957	101534	10561	8834	0
1975	85587	12603	22744	0
1992	69017	22538	29391	0
2016	54745	4754	60976	468

Tabla 9. Distribución de la vegetación sobre el escarpe (en m²).

ESCARPE	No vegetación (%)	Prado (%)	Arbustos (%)	Nulo (%)
1946	80	20	0	0
1957	84	9	7	0
1975	71	10	19	0
1992	57	19	24	0
2016	45	4	50	0

Tabla 10. Distribución de la vegetación sobre el escarpe (en %).

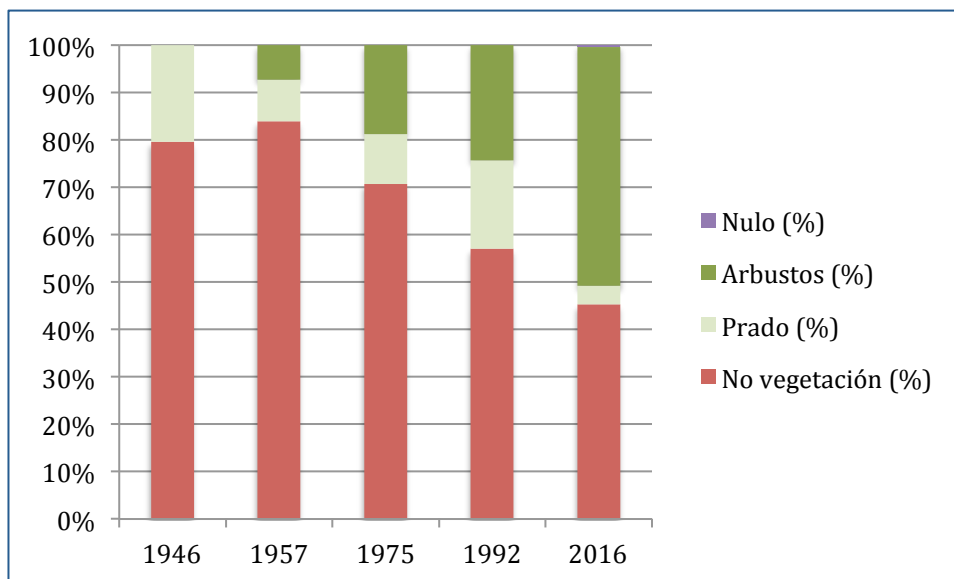


Figura 47. Gráfico sobre la distribución de la vegetación sobre el cono (en %y sin el término “nulo”).

Como en este caso el término “Nulo” es prácticamente residual, no se hará otro gráfico omitiéndolo.

Observando la *Figura 47*, vemos que la evolución de la vegetación en el escarpe es similar a la del cono, aunque no tan pronunciada. El motivo reside en el hecho de que esta zona está afectada directamente por la erosión, mientras que el cono está afectado indirectamente. Por ese motivo, la zona de “No vegetación” predomina aun más que en el cono, con niveles iniciales de 80%, disminuyendo hasta llegar entre 40%-50%. Los porcentajes de “Prado” oscilan entre el 10%-20%, llegando en la actualidad a menos del 5%. Finalmente, como ya pasó en el cono, la vegetación abundante (“Arbustos”) que inicialmente no tiene presencia, aumenta notablemente hasta llegar al 50% en 2016.

Analizados por separado el suelo del cono y del escarpe, podemos determinar que, en primer lugar, los resultados son coherentes entre ellos. En segundo lugar, según lo estudiado, podemos confirmar que la erosión de la zona se está paralizando lentamente, las zonas sin vegetación disminuyen anualmente, mientras que las zonas con vegetación aumentan. No obstante, como se ha mencionado anteriormente, en el cono, el crecimiento de la vegetación y decrecimiento de la zona sin vegetación es más acentuada que en el escarpe.

Además, para caracterizar el posible error cometido, se ha calculado el mismo comparando, por una parte, el área del polígono genérico referente al cono y al escarpe, y por otra parte la suma de los polígonos clasificatorios de cada año tanto como para cono y escarpe. Por lo tanto, como se verá a continuación, obtendremos 5 aproximaciones de error para el cono y otras 5 para el escarpe. El mayor de ellos resultará ser el error cometido, del cual se determinará su porcentaje y su equivalencia en metros cuadrados.

	Directo	1946	1957	1975	1992	2016
Área Cono (m ²)	88559	88527	88532	88539	88528	88535
Área Escarpe (m ²)	120927	120937	120929	120934	120946	120943

Tabla 11. Comparación de áreas obtenidas de manera directa (polígono genérico de cono y escarpe) e indirecta (sumando polígonos clasificatorios de cada año).

CONO					
Año	1946	1957	1975	1992	2016
Error (%)	0,0361	0,0305	0,0226	0,0350	0,0271
m ²	32	27	20	31	24

Tabla 12. Error cometido (en % y m²) en el cono.

ESCARPE					
Año	1946	1957	1975	1992	2016
Error (%)	0,0083	0,0066	0,0041	0,0099	0,0025
m ²	10	8	5	12	3

Tabla 13. Error cometido (en % y m) en el escarpe.

Analizando las tablas anteriores, vemos que el mayor error cometido es el referente al cono en 1946 (marcado en amarillo), el cual representa un error máximo menor al 0,04%, equivalente a unos 32 m².

-Resultados obtenidos en el análisis en la evolución del escarpe

La estructura en este subapartado será idéntico que en el anterior, se empezará mostrando figuras sobre las 5 ortofotografías donde estarán sobreimpresionados los polígonos simbolizando el área erosionada entre ortofotografías.

A continuación, nuevamente mediante tablas y gráficos, se caracterizará, por una parte el área erosionada, y por otra parte, como se ha visto, el volumen total erosionado, así como la erosión media anual.

Finalmente, se analizará y se extraerán conclusiones sobre cómo ha evolucionado el escarpe a lo largo de 70 años.

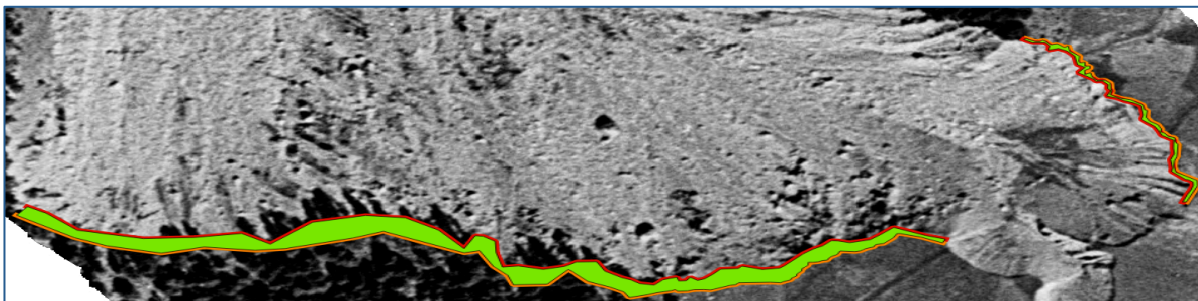


Figura 47. Evolución escarpe de 1946 a 1957 (en verde).

En rojo – Escarpe de 1946
En naranja – Escarpe de 1957

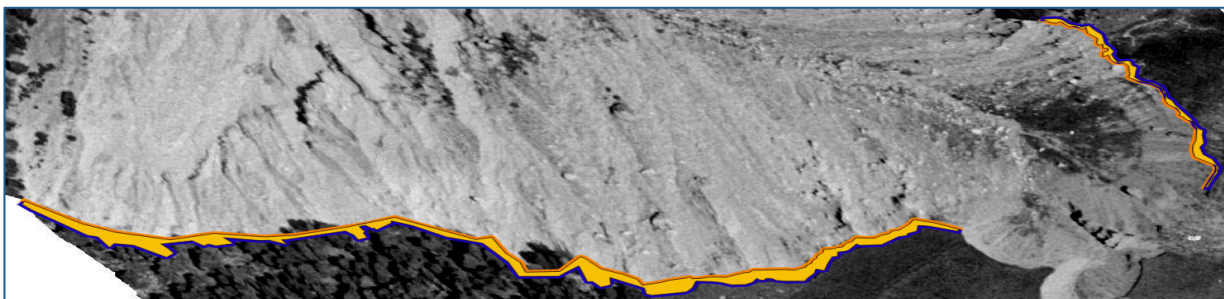


Figura 48. Evolución escarpe de 1957 a 1975 (en naranja).

En naranja – Escarpe de 1957
En azul – Escarpe de 1975

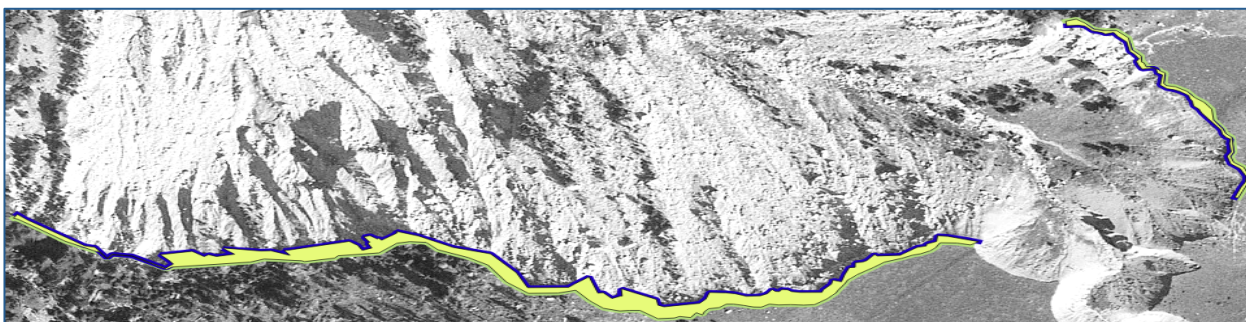


Figura 49. Evolución escarpe de 1975 a 1992 (en amarillo).

En azul – Escarpe de 1975
En verde – Escarpe de 1992

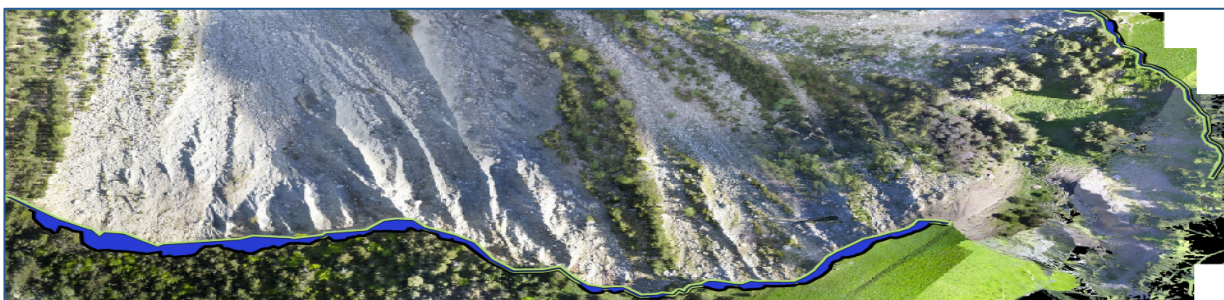


Figura 50. Evolución escarpe de 1992 a 2016 (en azul).

En verde – Escarpe de 1992
En negro – Escarpe de 2016

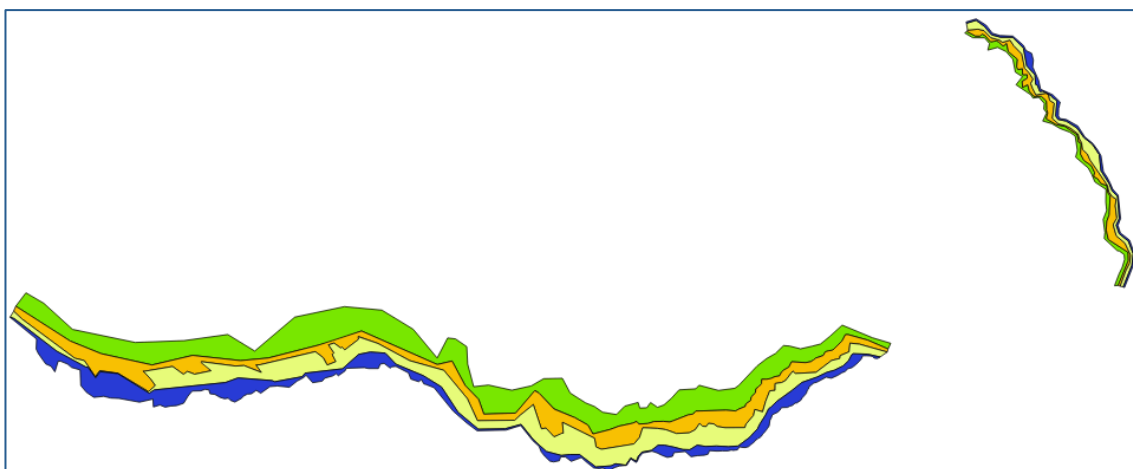


Figura 51. Esquema sobre la evolución total del escarpe.

En verde → 1946-57

En naranja → 1957-75

En amarillo → 1975-92

En azul → 1992-2016

Analizando la *Figura 51*, observamos que se puede dividir en dos zonas bien diferenciadas según la magnitud de erosión (separadas por la erosión de un pequeño riachuelo que al tratarse de un elemento externo, no está considerado).

La primera zona se encuentra a la izquierda del riachuelo, se trata de la región más activa en términos erosivos ya que se aprecia claramente como el volumen erosionado es mucho mayor.

Por otra parte, a la derecha del riachuelo tenemos la zona pasiva, la cual, en comparación con la anterior, el volumen erosionado es mucho menor.

Este fenómeno se ve reflejado en los resultados obtenidos en el análisis del suelo. Viendo la evolución sufrida durante los 70 años, en 1946 (*Figura 40*), la “No vegetación” está presente prácticamente en la totalidad del escarpe, de 1957 a 1992 (*Figuras 41, 42 y 43*), se distingue una evolución paulatina de vegetación sobre la zona pasiva del escarpe, mientras que en la zona activa sigue dominando la “No vegetación”. Finalmente, en 2016 (*Figura 44*), la zona activa permanece sin vegetación, mientras que en la zona pasiva predomina, con mucha claridad, la vegetación.

A continuación, cuantificaremos el área y volumen erosionados, representados mediante tablas y gráficos en los cuales se reflejará cual ha sido la evolución de la erosión a lo largo de los años.

Año	A (m ²)
1946	0
1957	3310
1975	5384
1992	8598
2016	10000

Tabla 14. Área (del escarpe) erosionada.

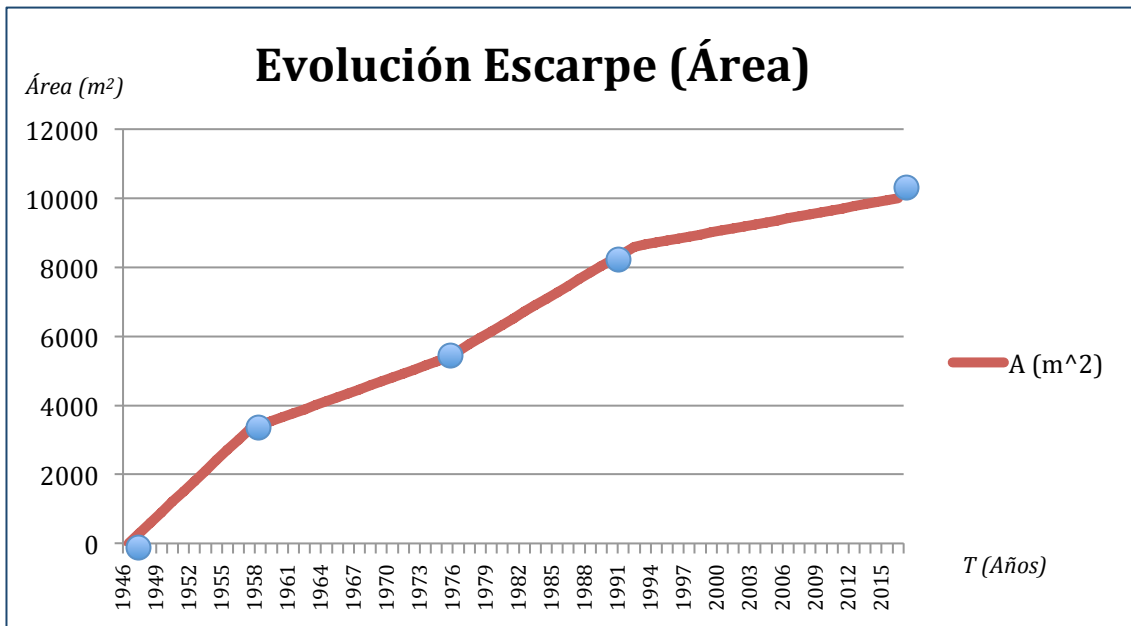


Figura 52. Evolución del escarpe (Área en m^2) durante 70 años. Comparando la velocidad de erosión desde 1946 a 1957 con la de 1992 a 2016, se aprecia claramente como la evolución del escarpe va menguando a lo largo de los años.

En azul – Años representativos (1946-1957-1975-1992-2016)

Como ya se ha explicado anteriormente, para calcular el volumen erosionado durante los 70 años, se ha usado la aproximación geométrica de la Figura 35.

Al tratarse de dos zonas con diferente magnitud erosionable, se ha estimado dicho volumen como la suma de dos aproximaciones geométricas, la primera referente a la zona más activa y la otra basada en la pasiva.

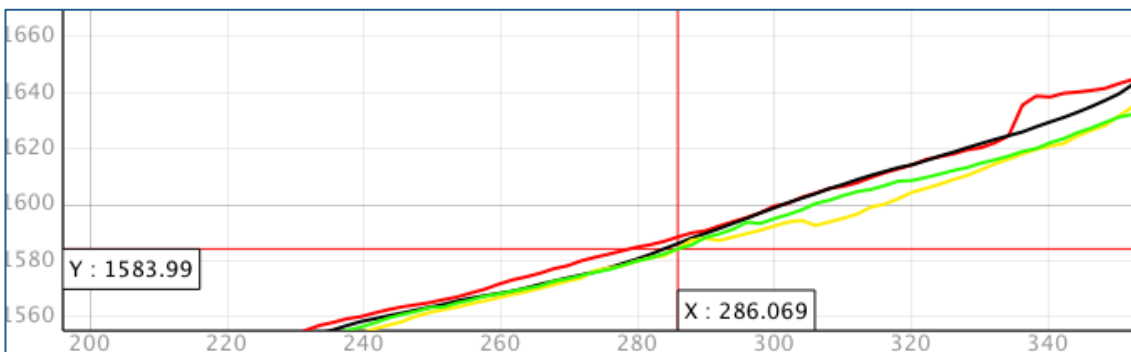


Figura 53. Perfil topográfico (1) referente a la zona activa del escarpe (en m).

En rojo – Perfil topográfico 1946
 En negro – Perfil topográfico 1975
 En verde – Perfil topográfico 1992
 En amarillo – Perfil topográfico 2016

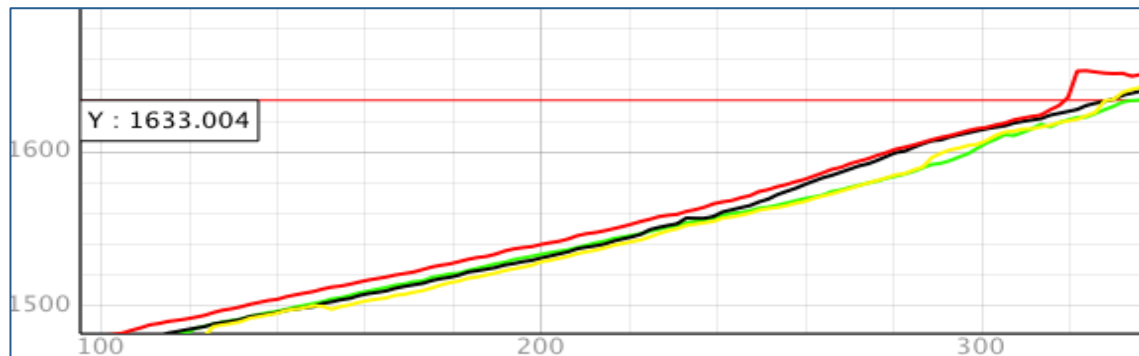


Figura 54. Perfil topográfico (2) referente a la zona activa del escarpe (en m).

En rojo – Perfil topográfico 1946
 En negro – Perfil topográfico 1975
 En verde – Perfil topográfico 1992
 En amarillo – Perfil topográfico 2016

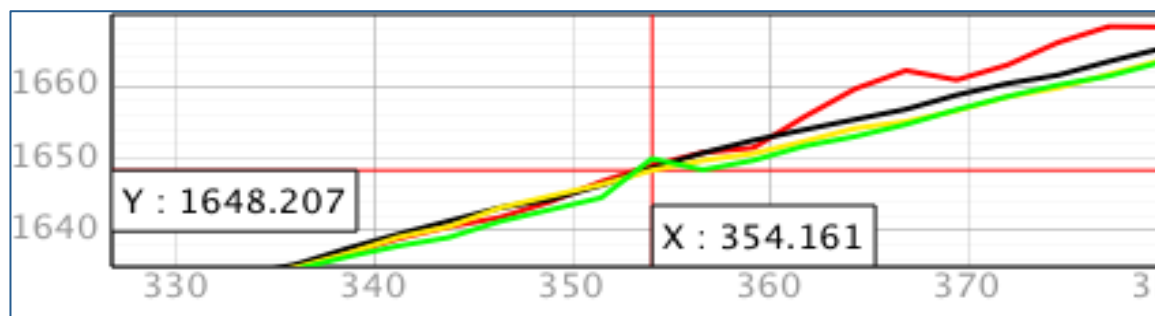


Figura 55. Perfil topográfico (3) referente a la zona activa del escarpe (en m).

En rojo – Perfil topográfico 1946
 En negro – Perfil topográfico 1975
 En verde – Perfil topográfico 1992
 En amarillo – Perfil topográfico 2016

La “L” utilizada en la aproximación geométrica será la resultante de la media aritmética de los 3 perfiles topográficos anteriores.

Como se vio en el apartado “Metodología”, dicha “L” se determinará, en un primer momento, como la distancia entre el inicio del escarpe y el punto donde se unen los perfiles, representando el área erosionable. Como también se argumentó, esta distancia obtenida representa la longitud L sobre el plano (Figura 50). La verdadera L se estimará mediante el Teorema de Pitágoras.

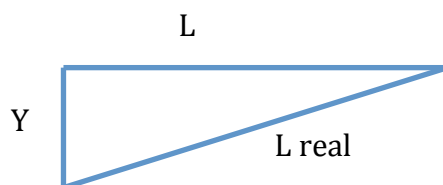


Figura 56. Aproximación geométrica de L real.

$$L_{real} = \sqrt{Y^2 + L^2}$$

Analizando los 3 perfiles topográficos, determinamos que la “L” tiene un valor medio de 50 metros, mientras que la “Y” ronda los 40 m. Por lo tanto, si aplicamos el Teorema de Pitágoras para encontrar la “L real”, resulta:

$$L \text{ real (zona activa)} = \sqrt{Y^2 * L^2} = \sqrt{40^2 + 50^2} = 64,03 \text{ m}$$

Determinada la L utilizada en la aproximación geométrica de la zona activa del escarpe, estimaremos la distancia que será usada en la región pasiva del mismo según la *Figura 57*.

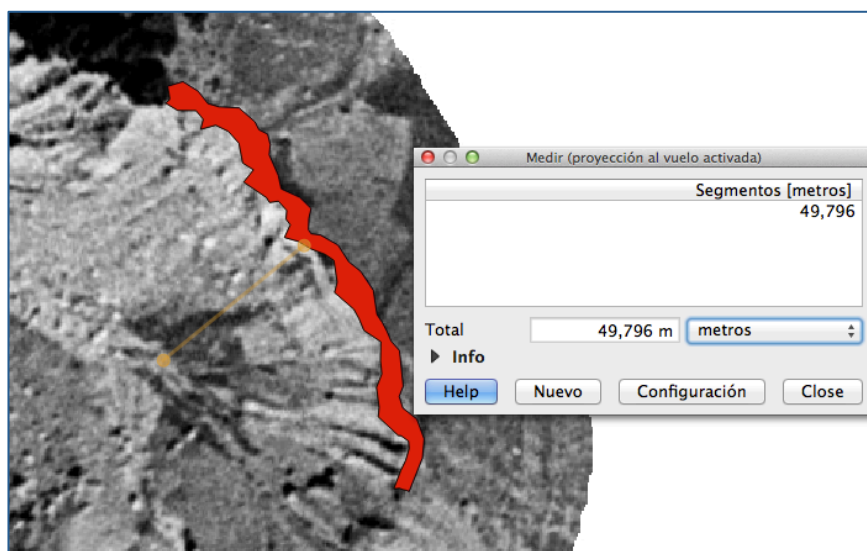


Figura 57. Determinación L de región pasiva (en rojo escarpe total erosionado).

Pese a que no se aprecia nítidamente, la distancia de la *Figura 57*, queda delimitada superiormente por el propio escarpe e inferiormente por el nombrado riachuelo. Por lo tanto, la longitud estimada, sobre el plano, en este caso es 50 m, siendo la altura Y idéntica que en el caso anterior, consecuentemente: Y=50m, L=50 m:

$$L \text{ real (zona pasiva)} = \sqrt{Y^2 * L^2} = \sqrt{50^2 + 50^2} = 70,7 \text{ m}$$

Definidos todos los componentes geométricos de ambas aproximaciones, se procede al cálculo del volumen total erosionado como resultado de la suma de la zona activa y la zona pasiva.

Año	V (m ³)
1946	0
1957	106633
1975	173868
1992	277872
2016	323129

Tabla 15. Volumen (del escarpe) erosionada.

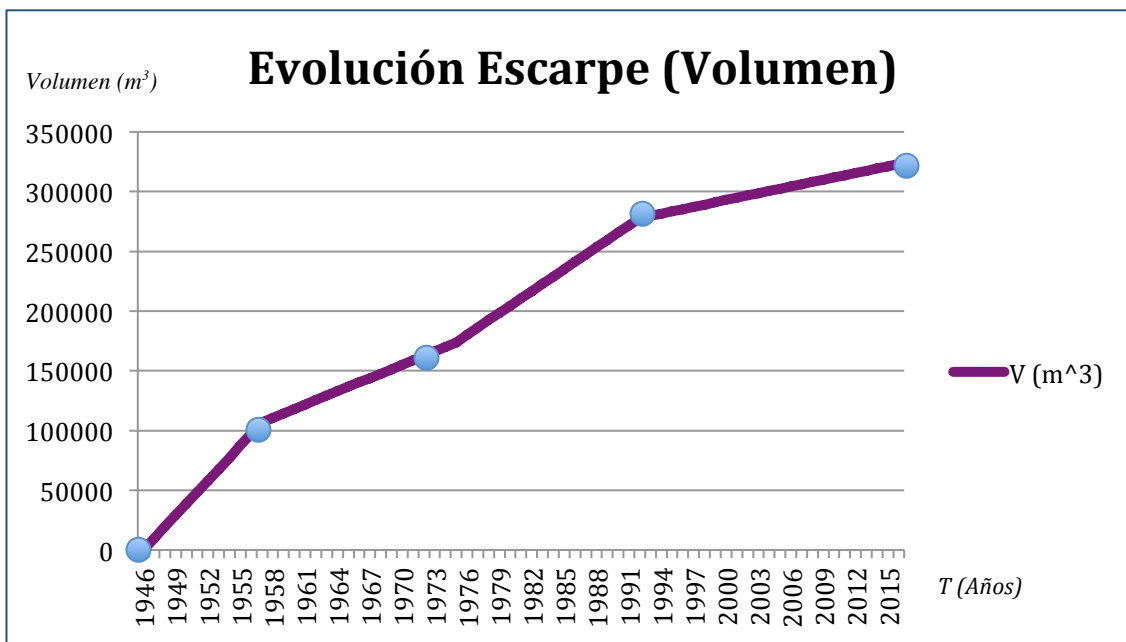


Figura 58. Evolución total (zona activa y pasiva) del escarpe.

En azul – Años representativos (1946-1957-1975-1992-2016)

	Erosión media anual (m^2)
1946-57	9694
1957-75	3735
1975-92	6118
1992-2016	1886

Tabla 16. Erosión media anual desde 1946 a 2016.

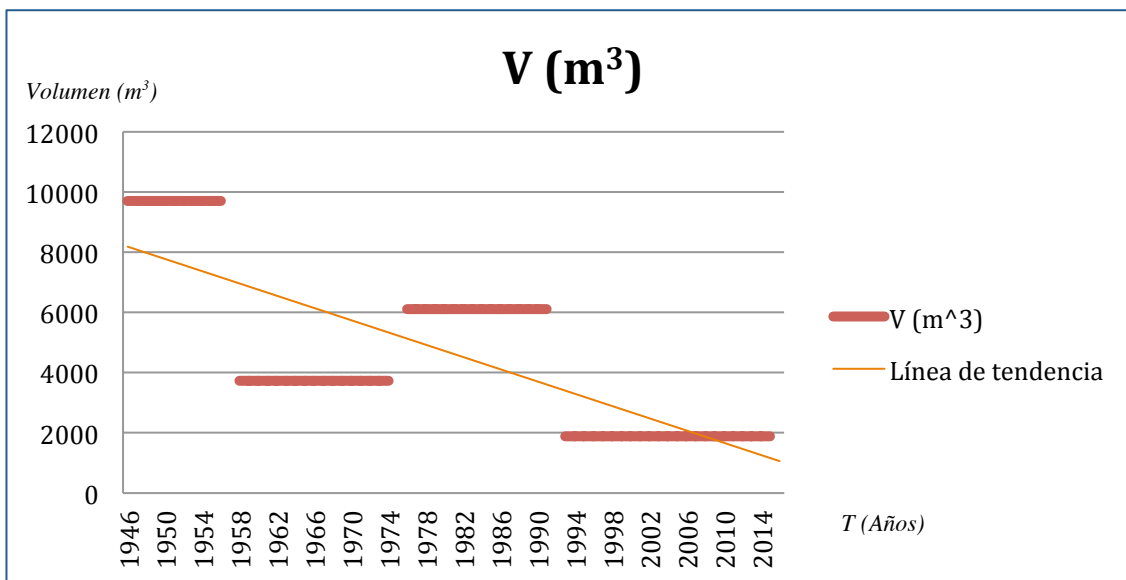


Figura 59. Gráfico sobre la erosión media anual (en rojo) y su línea de tendencia (en naranja).

Como resultado global de este estudio sobre la erosión del escarpe a lo largo de 70 años se obtiene un área total de 10.000 m² y un volumen de 323.129 m³.

Por otra parte, la *Tabla 16* y la *Figura 59* muestran la erosión media anual entre los años característicos (1946, 1957, 1975, 1992 y 2016).

Como se aprecia a primera vista y luego confirma la línea de tendencia (en naranja), determinamos que la erosión ha ido disminuyendo durante este periodo de tiempo y que, previsiblemente, seguirá aminorando en los próximos años. Por lo tanto, a modo de predicción futura, extrapolando con los datos obtenidos, se pronostica una paulatina reducción de la erosión hasta el hipotético cese de la misma.

Planteados y comentados los resultados obtenidos sobre el Análisis del suelo y el Análisis del escarpe y antes de exponer los mismos referentes a la meteorología, podemos determinar que dichos resultados son coherentes entre sí. En el Análisis del suelo advertimos una notable evolución de la vegetación, claro indicador de la disminución de la erosión, como se ha confirmado con el Análisis del escarpe, por lo tanto, hasta el momento, resultados acordes entre sí.

-Resultados obtenidos en el análisis de la meteorología de la zona

Como se mencionó en el apartado de Metodología, mediante los datos meteorológicos de la zona facilitados por la UPC, se han realizado estudios estadísticos con el objetivo de caracterizar y cuantificar cuánto y cómo ha llovido a lo largo de los 70 años.

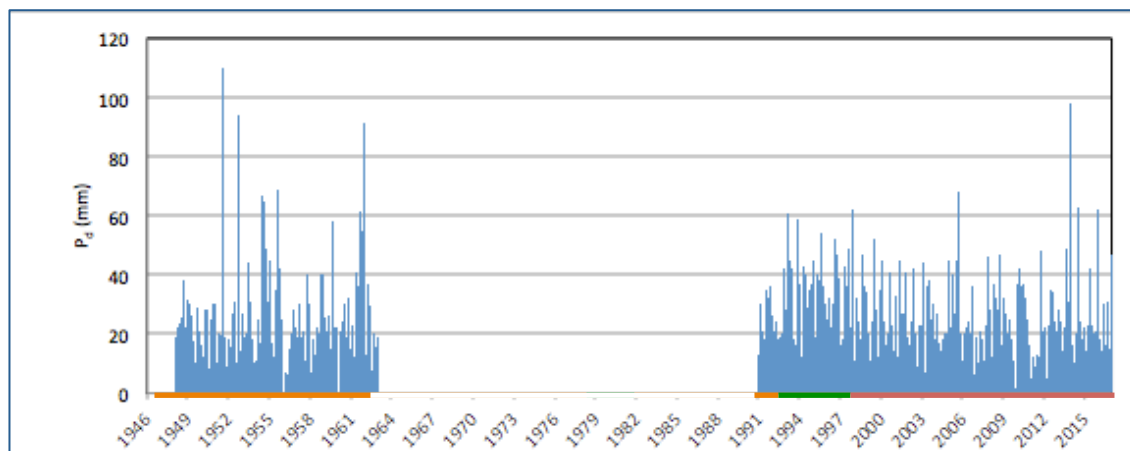


Figura 60. Precipitación diaria (en mm) desde 1946 hasta 2016.

En naranja – Datos obtenidos con la estación meteorológica de Boí Central

En verde – Datos obtenidos con la estación meteorológica de Vilaller

En rojo – Datos obtenidos con la estación meteorológica de Pont de Suert

Como se observa en la figura anterior, no hay mediciones de la precipitación desde 1965 hasta 1990. No obstante, como se justificó, nuevamente en el apartado de Metodología, este hecho no influirá en la comprensión de los resultados.

Analizando las figuras anteriores referentes a la precipitación sobre la población de Senet, podemos determinar que a lo largo de estos 70 años, la precipitación ha aumentado.

No obstante, si bien es cierto que ha llovido con más abundancia durante los últimos años, los picos máximos de precipitación (110mm) tuvieron lugar entre 1950 y 1960, mientras que las precipitaciones máximas más actuales son de 98mm y 68mm (entre 2000-16), siendo en este último caso, casi la mitad que en los años anteriores.

En conclusión, la precipitación sobre nuestra zona de estudio ha aumentado durante los últimos 70 años, sin embargo, los episodios de precipitación extrema han disminuido.

Cabe destacar que el hecho de que los datos meteorológicos hayan sido tomados con diferentes estaciones meteorológicas según intervalo anual (definidos en la *figura 60*), puede influir en los resultados finalmente obtenidos.

- CONCLUSIONES

Se ha establecido como objeto de este estudio el análisis de la evolución morfológica de la cuenca torrencial el Rebaixader y la relación de las posibles modificaciones en la estructura geológica de la zona con la evolución del clima.

Como consecuencia de las modificaciones en los sistemas de circulación oceánica y atmosférica, se prevé un cambio climático que a nivel global provoque un aumento progresivo de la temperatura media del planeta, la elevación del nivel del mar y la fusión de los casquetes polares y los glaciares. Por lo que se refiere a nivel local, se estima que cada vez sean más frecuentes los fenómenos meteorológicos extremos, como las lluvias torrenciales, tornados y sequías.

El interés del estudio de las consecuencias de los cambios climáticos en el terreno radica en que, a nivel geológico, uno de los fenómenos que más riesgos provoca en nuestro país son los movimientos de ladera en zonas de montaña. Estas inestabilidades pueden afectar a obras de infraestructura, poblaciones y lugares de ocio, llegando a producir importantes pérdidas económicas y de vidas humanas.

Tras la observación de los movimientos en masa que se producen en el barranco desde 1946 hasta la actualidad a través del análisis de ortofotografías, se concluye que las zonas sin vegetación, que durante los primeros años llegaron a ocupar el 80% del total del área, ha ido menguando hasta cubrir menos del 30%. Por otra parte, las zonas con vegetación (desde prados a arbustos), que en un primer momento rondaba el 20%, en los últimos años ha llegado a valores superiores al 70% del total de la zona estudiada. Por lo tanto, determinamos que claramente han aumentado las zonas con vegetación tanto en la zona del cono como del escarpe.

Paralelamente, se ha realizado un estudio pluviométrico de la zona, nuevamente desde 1946 hasta 2016, a partir de los registros obtenidos por varias estaciones meteorológicas próximas a la zona. Tras el análisis de los resultados estadísticos de pluviometría realizados, se observa que la precipitación ha aumentado progresivamente en la zona demarcada.

Al poner en relación la evolución de las lluvias, como principal factor erosivo del clima, con la evolución de la estructura morfológica del barranco, observamos que se ha producido un incremento paulatino en las precipitaciones y una disminución en la erosión del suelo. Este fenómeno encuentra su explicación en el hecho de que si bien es cierto que se ha producido un incremento general en las precipitaciones, también lo es que se han reducido los episodios torrenciales extremos, que son los realmente erosivos. Ello ha contribuido al incremento de las zonas de vegetación y a la consolidación del suelo, con la consiguiente reducción en la erosión del terreno.

Por lo tanto, en base a los resultados obtenidos, se puede afirmar que, al menos en la zona de estudio (Alta Ribagorza) y en términos meteorológicos, la región no está afectada por el supuesto cambio climático.

A modo de predicciones futuras, se puede establecer que, si la meteorología no varía y, en general, los agentes externos se mantienen constantes, la zona dejará de erosionarse y llegará a cubrirse, prácticamente en su totalidad, de vegetación.

6. LISTADO DE TABLAS

<i>Tabla 1. Resumen de los movimientos de masa.</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 2. Datos sobre las ortofotografías utilizadas.</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 3. Características Estación meteorológica Vilaller.</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 4. Características Estación meteorológica Boí Central.</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 5. Características Estación Meteorológica de Pont de Suert.</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 6. Distribución de la vegetación sobre el cono.</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 7. Distribución de la vegetación sobre el cono.</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 8. Distribución de la vegetación sobre el cono.</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 9. Distribución de la vegetación sobre el escarpe.</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 10. Distribución de la vegetación sobre el escarpe.</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 11. Comparación de áreas obtenidas de manera directa (polígono genérico de cono y escarpe) e indirecta (sumando polígonos clasificatorios de cada año)</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 12. Error cometido (en % y m²) en el cono.</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 13. Error cometido (en % y m) en el escarpe.</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 14. Área (del escarpe) erosionada.</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 15. Volumen (del escarpe) erosionada.</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 16. Erosión media anual desde 1946 a 2016.</i>	<i>60</i>

7. LISTADO DE FIGURAS

<i>Figura 1. Distribución granulométrica de las corrientes de derrubios y de las coladas de barro.</i>	13
<i>Figura 2. Zonas de un Debris Flow.</i>	14
<i>Figura 3. Situación geográfica de la Alta Ribagorza.</i>	20
<i>Figura 4. Situación topográfica de la Alta Ribagorza.</i>	20
<i>Figura 5. Mapa geológico de la zona de estudio, Escala 1:25000.</i>	21
<i>Figura 6. Vista aérea del "Barranc del Rebaixader".</i>	22
<i>Figura 7. Fotografía donde se observa el substrato rocoso (pizarras) junto a los bloques del till.</i>	22
<i>Figura 8. Corte geológico esquemático de la zona de estudio.</i>	23
<i>Figura 9. Ortofotografía de la Cuenca torrencial El Rebaixader, 1946.</i>	25
<i>Figura 10. Ortofotografía de la Cuenca Torrencial El Rebaixader, 1957.</i>	26
<i>Figura 11. Ortofotografía de la Cuenca Torrencial El Rebaixader, 1975.</i>	26
<i>Figura 12. Ortofotografía de la Cuenca Torrencial El Rebaixader, 1992.</i>	27
<i>Figura 13. Ortofotografía de la Cuenca Torrencial El Rebaixader, 2016.</i>	27
<i>Figura 14. MDE de 1946.</i>	28
<i>Figura 15. MDE de 1975.</i>	29
<i>Figura 16. MDE de 1992.</i>	29
<i>Figura 17. MDE de 2016.</i>	30
<i>Figura 18. Ejemplo de Perfil Topográfico (m)</i>	30
<i>Figura 19. Ejemplo de tonalidades de grises según el reflejo solar sobre el cono del movimiento de masa.</i>	32
<i>Figura 20. Ejemplo de clasificación del cono mediante polígonos según la tonalidad de grises.</i>	33
<i>Figura 21. Los polígonos clasificatorios siempre quedan delimitados por el polígono genérico tanto del cono como del escarpe.</i>	33
<i>Figura 22. Ejemplo de ortofotografía a color.</i>	34
<i>Figura 23. Ejemplo de clasificación del escarpe mediante polígonos su tonalidad.</i>	34
<i>Figura 24. Los polígonos clasificatorios siempre quedan delimitados por el polígono genérico tanto del cono como del escarpe.</i>	35
<i>Figura 25. Polígonos representativos del cono (lila) y del escarpe (naranja).</i>	35
<i>Figura 26. Una de las medidas de separación entre polígonos clasificatorios.</i>	36
<i>Figura 27. Ejemplo de línea delimitando el escarpe.</i>	37
<i>Figura 28. Ejemplo de conjunto de líneas obtenido en la que si el movimiento de masa se encuentra hacia la dirección de la flecha, la línea roja simbolizaría al escarpe más antiguo y la naranja al escarpe más moderno.</i>	37
<i>Figura 29. En verde, el polígono representativo del área comprendido entre las líneas (escarpes) anteriores.</i>	37
<i>Figura 30. Error en la medición del escarpe, 1946.</i>	38

<i>Figura 31. Error en la medición del escarpe, 1957.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 32. Error en la medición del escarpe, 1975.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 33. Error en la medición del escarpe, 1992.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 34. Error en la medición del escarpe, 2016.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 35. Aproximación geométrica del volumen del escarpe erosionado.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 36. Posición de los 3 perfiles topográficos.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 37. Representación gráfica de la mecánica de erosión del escarpe. En azul terreno mas antiguo (ya erosionado) y verde más moderno.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 38. Estación meteorológica de Pont de Suert.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 39. Posición geográfica de las diferentes estaciones meteorológicas.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 40. Análisis del suelo mediante polígonos, 1946.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 41. Análisis del suelo mediante polígonos, 1957.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 42. Análisis del suelo mediante polígonos, 1975.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 43. Análisis del suelo mediante polígonos, 1992.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 44. Análisis del suelo mediante polígonos, 2016.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 45. Gráfico sobre la distribución de vegetación sobre el cono.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 46. Gráfico sobre la distribución de la vegetación sobre el cono.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 47. Evolución escarpe de 1946 a 1957 (en verde)</i>	<i>55</i>
<i>Figura 48. Evolución escarpe de 1957 a 1975 (en naranja)</i>	<i>55</i>
<i>Figura 49. Evolución escarpe de 1975 a 1992 (en amarillo)</i>	<i>55</i>
<i>Figura 50. Evolución escarpe de 1992 a 2016 (en azul)</i>	<i>55</i>
<i>Figura 51. Esquema sobre la evolución total del escarpe.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 52. Evolución del escarpe (Área en m²) durante 70 años.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 53. Perfil topográfico (1) referente a la zona activa del escarpe (en m).</i>	<i>57</i>
<i>Figura 54. Aproximación geométrica de L real.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 55. Perfil topográfico (2) referente a la zona activa del escarpe (en m).</i>	<i>58</i>
<i>Figura 56. Perfil topográfico (3) referente a la zona activa del escarpe (en m)</i>	<i>58</i>
<i>Figura 57. Determinación L de región pasiva.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 58. Evolución total (zona activa y pasiva) del escarpe.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 59. . Gráfico sobre la erosión media anual (en rojo) y su línea de tendencia (en naranja)</i>	<i>60</i>
<i>Figura 60. Precipitación diaria (en mm) desde 1946 hasta 2016.</i>	<i>61</i>

8. BIBLIOGRAFÍA

- Corominas, J. 1989. “Clasificación y reconocimiento de los movimientos de ladera”.
En: J. Corominas(Ed.). *Estabilidad de Taludes y Laderas Naturales*. Monografía nº3.
Sociedad Española de Geomorfología. Zaragoza. Pp. 1-30
- Corominas, J. y Alonso, E. 1984. “Inestabilidad de laderas en el Pirineo Catalán.
Tipología y causas”. *Jornadas sobre la Inestabilidad de Laderas en el Pirineo*.
Universidad Politécnica de Barcelona: C-1-C.53
- Corominas, J. y García Yagüe, A. 1997. “Terminología de los movimientos de ladera”. IV
Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Granada. Vol. 3: 1051-1072
- Novoa, M. (1984). “*Precipitaciones y avenidas extraordinarias en Cataluña. Inestabilidad de laderas en el Pirineo*”. ETSEECBPB (UPC), Barcelona, pgs. I.1.1-I.1.15.
- Pierson, T.C., Costa, J.E. (1987). “*A rheologic classification of subaereal sediment-water flows*”. Geol. Soc. Am. Rev. Eng. Geol. VII, pgs. 1-12
- Hürlimann M., Abancó C., Moya J., Raïmat C., Luis-Fonseca R. (2011). “*Debris-flow monitoring stations in the Eastern Pyrenees. Description of instrumentation, first experiences and preliminary results*”. In: Genevois R, Hamilton D, Prestininzi A (eds) 5th Int. Conf. On Debris-Flow Hazards Mitigation, Padua, pp. 553–562.
- Varnes, D. (1978). “*Slope movement types and processes*”, Special report 176. En R. K. Schuster, Landslides: analysis and control. Transportation research Board, pgs. 11-33.
- Vilaplana, J.M. (1983). “*Quaternary glacial geology of the Alta Ribagorça basin (Central Southern Pyrenees)*”. Acta Geológica Hispánica .18:217-233.
- Costa, J.E. (1984). “*Physical geomorphology of debris flows*”. En: Developments and applications of Geomorphology (Eds. J.E. Costa y P.J. Fleisher). Springer Verlag, pgs. 268-317.

ENLACES CONSULTADOS

-Página web del *Cambio Climático*. Información [Consulta: marzo 2017]. Disponible: https://es.wikipedia.org/wiki/Cambio_climático

-Página web de Estación meteorológica en Pont de Suert. Información [Consulta: abril 2017]. Disponible en <http://inspontdesuert.com/news/nova-estacio-meteorologica-al-centre>

-Página web sobre QGIS. Información [Consulta: Abril 2017]. Disponible en <https://es.wikipedia.org/wiki/QGIS>

-Página web sobre GDAL y OGR. Información [Consulta: Abril 2017]. Disponible en <https://es.wikipedia.org/wiki/GDAL>

-Página web sobre las estaciones meteorológicas. Información [Consulta: Abril 2017]. Disponible en <http://www.meteo.cat/observacions/llistat-xema>